

# E型鉄心を用いたベアリングレスリニアスライダの低エネルギー制御

## Low Power Control of Bearingless Linear Slider Using E-type Iron Core

知能機械工学コース

機械システム制御研究室 菊田 和範

### 1. 諸言

近年、需要の高まっている半導体や医薬品などの製造過程では空気の高清浄度が必要である。そのような環境では、機械的な接触のない磁気浮上装置は塵埃の発生を抑えることができるため有用である。

このような磁気浮上装置として、E型鉄心を用いて推進を行う電磁石と浮上を行う電磁石を一体化することで、磁気浮上機構とリニアアクチュエータの機構を統合したベアリングレススライダが開発されている。<sup>(1)</sup>しかし、浮上中に常に三相電流を必要とするため、消費電力が大きいという問題がある。

本研究では、スライダが静止している際に電磁石への電力供給を不要とするゼロパワー浮上方式を導入し、消費電力の削減を図ることを目的とする。電磁界解析ソフトウェアを用いて推進力および浮上力の特徴を評価し、ゼロパワー浮上を実現するための構造および条件について設計検討を行った。その結果として、本方式の適用可能性について検証した内容を報告する。

### 2. ゼロパワー浮上

#### 2.1 ゼロパワー浮上原理

ゼロパワー浮上制御とは、電磁石と永久磁石を組み合わせた複合磁石を用いて、永久磁石に発生する吸引力のみで浮上対象物の重量を支持することで、制御電流を定常的にゼロに保つ制御方式である。その概念図を図 2.1 に示す。本制御を成立させるためには、永久磁石の吸引力と浮上支持荷重とが釣り合う位置において浮上体を安定的に保持する必要がある。したがって、浮上支持荷重が増加した場合には、永久磁石の磁極と同方向の磁力を生じさせる電流を電磁石に印加し、吸引力を補償的に増加させる。一方、浮上支持荷重が減少した場合には、永久磁石の磁極と逆方向の磁力を発生させることで吸引力を低減する。このような制御を行うことで、定常状態においては電磁石への制御電流をゼロにすることで、消費電力の低減が期待できる。

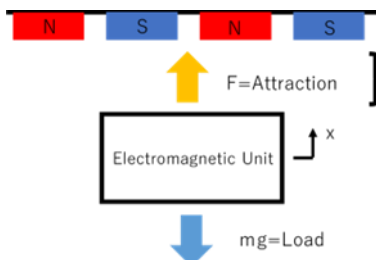


Fig.2.1 Model of zero-power magnetic levitation

### 2.2 制御方法<sup>(1)</sup>

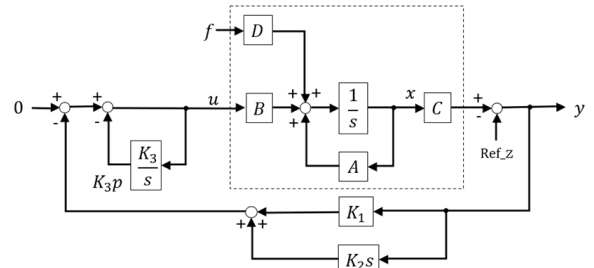


Fig.2.1 Zero Power controller

Table 1 Symbol description

$u$	Current for apply to EMcoil	$A$	coefficient matrix
$x$	state variable (displacent,velocity)	$B$	input matrix for the equation of state
$K_1$	proportional gain	$C$	output matrix
$K_2s$	derivative gain	$D$	disturbance vector
$\frac{K_3}{s}$	integral gain	$y$	output (displacent,velocity)
$f$	disturbance	$p$	output of an integrator
$z$	Air gap		

ゼロパワー浮上制御のブロック線図を図 2.1 に示す。操作量  $u$  は、センサーによって検出されたギャップ変化に対する PD 制御出力と、励磁電流の積分値にゲイン  $K_3$  を乗じた電流積分ループからの局所フィードバック信号を用いて算出される。各制御ゲインは、系が安定となるよう適切に設計する。

### 3. FEM 解析

#### 3.1 ゼロパワー浮上制御

##### 3.1.1 解析方法

浮上体と磁気レールの水平方向の位置関係において、推進力が+から-となる位置（以下安定点）で浮上体は静止する。本研究で行うゼロパワー浮上では安定点と吸引力が浮上支持荷重と一致することが必要なため、推進力、浮上力を確認するために解析を行った。解析には FEM 電磁界解析ソフトウェア JMAG を使用し、浮上体と磁気レールの水平方向の位置関係が一周期となる 30mm 移動させて、コイルに電流を流さずに解析を行った。

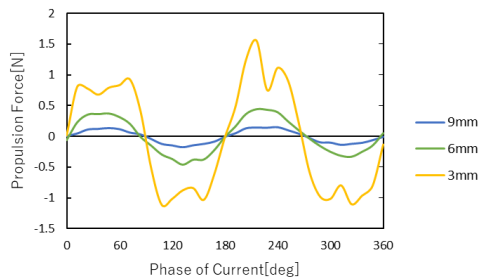


Fig.3.1 Thrust force when moving horizontally at each air gap

図 3.1 に推進力の結果を示す。推進力の大きさは周期的に推移しており、エアギャップが小さくなると推進力が大きくなることが確認できた。また、安定点になる位置が 2 点存在する。

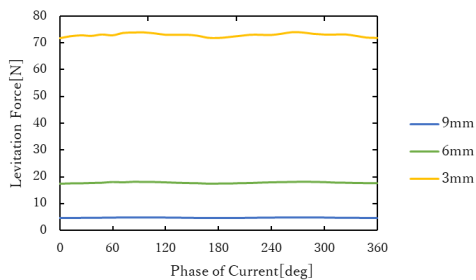


Fig.3.2 Levitation force when moving horizontally at each air gap

図 3.2 に浮上力を示す。発浮上力の大きさはエアギャップが変化することによって変化する。エアギャップが 9mm の場合は約 4.6N~4.9N, エアギャップが 6mm の場合は約 17.3~18.2N, エアギャップが 3mm の場合は約 71N~74N で周期的に推移し、エアギャップが小さいほど浮上力が大きいことが確認できる。ゼロパワー浮上では、浮上支持荷重と浮上力が釣り合う位置が重要になるため、図よりエアギャップによって浮上力は大きく変化するため、適切なエアギャップの設定が必要になる。

#### 4. 実験機

使用した実験装置を図 15 に示す。電磁石ユニットのみで浮上推進制御を行う場合はピッチングトルクが発生する。しかし、本試験機では電磁石ユニットを、車輪を利用したレバーアームに固定することで、ピッチングトルクを車輪のシャフト軸を中心とした回転トルクとして浮上力に変換する。そのため、ピッチング方向の自由化の安定化は不要であり、浮上制御のみで浮上推進制御を行う。

鉛直方向センサーを利用することでエアギャップの位置関係を得る。それによって、ゼロパワー浮上制御時と推進制御時に適した三相交流を利用して制御を行う。

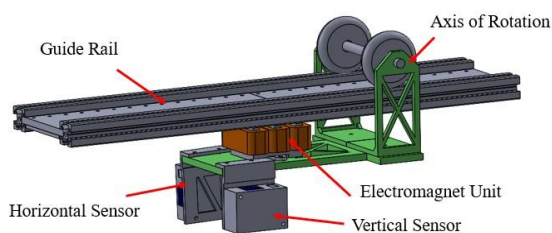


Fig. 4.1 Experimental device

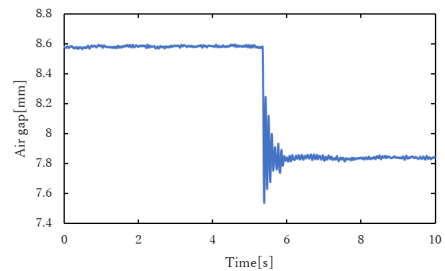


Fig. 4.2 Air gap during zero power cover control

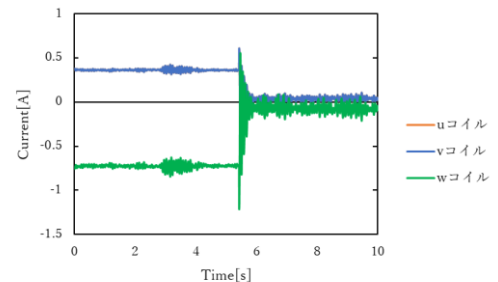


Fig.4.3 Coil current during zero power cover control

図 X にエアギャップおよび各コイル電流の時間応答を示す。0~約 5.5 s までは PD 制御により浮上が安定して維持され、この間、各コイルには定常的な電流が流れている。約 5.5 s に積分器を用いた局所フィードバックを追加すると、エアギャップは過渡振動を伴いながら新たな定常値へ収束し、同時に各コイル電流はゼロ近傍へと収束した。以上より、定常電流を消費しないゼロパワー浮上が実現されていることが確認できる。

#### 5. 結言

本研究では、E 型鉄心を用いたベアリングレスリニアスライダにゼロパワー浮上制御を適用し、省電力運用の可能性を示した。評価試験機にゼロパワー制御を適用した結果、定常状態において電流が抑制されることを確認し、本制御方式による省電力動作が実現可能であることを示した。

今後は、本研究で設計したゼロパワー浮上制御から推進制御への切り替えを実機に適用し、実際の装置において浮上と推進が安定して行えるかを実験によって確認する予定である。また、複数の電磁石ユニットを用いた場合についても検討を行い、実用的な装置への適用を目指す。

#### 参考文献

- (1) 勝部 雄士, 岡 宏一, "E 形鉄心を用いた省電力型ベアリングレススライダの浮上推進制御" 修士学位論文, 高知工科大学 (2024)
- (2) 片岡 龍太, 岡 宏一, "E 型鉄心を用いたベアリングレスリニアスライダの開発-4 点式浮上機構の検討-" 修士学位論文, 高知工科大学 (2021)
- (3) 電気学会磁気浮上技術調査専門委員会, "磁気浮上と磁気軸受け" (1993) コロナ社 p.104
- (4) 森下 明平, 小豆沢 照男, "常電導吸引式磁気浮上系のゼロパワー制御" 電気学会論文誌 D (産業応用部門誌) 1988 年 108 巻 5 号 p. 447-454