

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

Control of power save bearingless slider using E-shaped iron core

知能機械工学コース
機械・航空システム制御研究室 1265005 勝部 雄士

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。⁽¹⁾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。また、鉛直方向のセンサーのみで運用を行っていたため、推進と浮上の可逆的な切り替え制御ができない問題があった。

本研究では、この磁気スライダに対し、スライダが停止している状態では、電磁石に必要な電力が0となるゼロパワー浮上制御を利用することによる消費電力の低減と、水平方向のセンサーを利用することにより可逆的な浮上と推進の切り替え制御を可能とすることを目指す。以上の2点を、電磁界解析ソフトウェアを用いて推進力、浮上力を計算し、ゼロパワー浮上制御と推進制御の設計を行い、その可能性を検討し、これを報告する。

2. ゼロパワー浮上⁽³⁾

2.1 ゼロパワー浮上原理

ゼロパワー浮上制御とは永久磁石の吸引力のみで浮上させる制御方法である。そのためには永久磁石の吸引力が浮上支持荷重と釣り合う位置に浮上体を維持させる必要がある。荷重が変化した際には電磁石を用いて永久磁石との距離を変化させることで、釣り合う位置に移動させる。この制御方法は定常状態において電磁石に必要な電力が0であるため、消費電力の低減が見込まれる。

2.2 制御方法

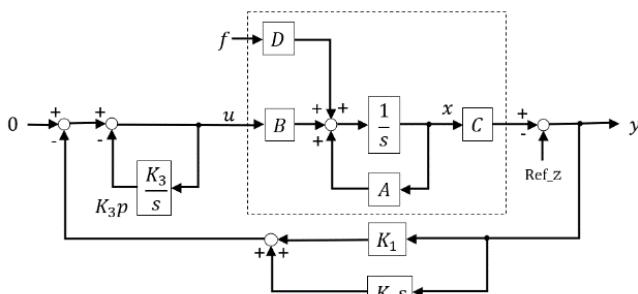


Fig. 1 Zero Power controller

Table 1 Symbol description

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

図1にゼロパワー制御の構成、表1に記号の説明を示す。今回のゼロパワー浮上の方法として、入力を局所フィードバックする方式を用いた。

K_1 , K_2 , K_3 はフィードバックゲインであり、これらを適切に設定することにより、閉ループ系を安定にすると同時に、電流磁気浮上システムの入力である u を0に収束させることができる。

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。

3.1.2 解析結果・考察

図2に浮上力の解析結果を示す。浮上力は周期的に変化し、浮上支持荷重 6.6N と吸引力が等しいエアギャップは7.875~7.975mmの範囲であることが確認できた。よって、浮上支持荷重と吸引力が等しいエアギャップは式(1)で表される。

$$y = A \sin 2\pi \left(\frac{x}{\lambda} + \phi \right) + \alpha = 0.5 \sin \left\{ \frac{2\pi x}{15} - \frac{\pi}{2} \right\} + 7.925 \quad (1)$$

図3に推進力のエアギャップ 7.875~7.975mm の時の解析結果を示す。エアギャップの変化によって推進力は変化せず、推進力が+から-になる位置は 7.5mm, 22.5mm であることが確認できた。よって、エアギャップの値に関わらず、安定点は 7.5mm, 22.5mm である。

図2の浮上力、図3の推進力の解析結果からゼロパワー浮上制御が可能な位置関係は水平位置が7.5mm, 22.5mm且つ、エアギャップが7.975mmの場合である。

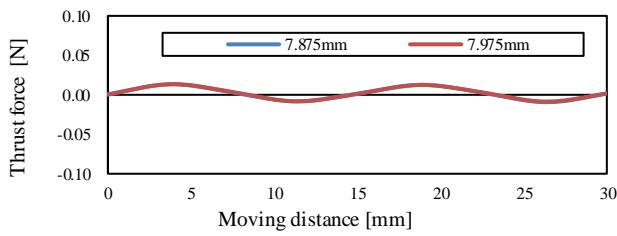


Fig. 2 Relation between floating support load and air gap

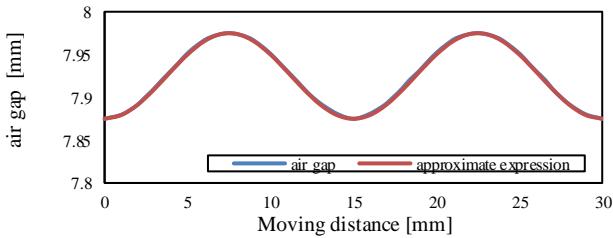


Fig. 3 Thrust force when moving horizontally at each air gap

3.2 推進制御

3.2.1 解析方法

本研究で行う推進制御では浮上するために浮上支持荷重6.6N以上の浮上力が発生する条件が必要である。また、前進制御を行う場合は+、後進制御を行う場合は-の推進力が必要である。以上の条件を満たし、浮上と推進が可能であることを確認するために、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、エアギャップは7.925mm、永久磁石と電磁石の位置関係が一周期となる30mm移動させて、1Aの三相交流をコイルに1周期分流し、解析を行った。

3.2.2 解析結果・考察

図4に電流位相と水平方向の位置関係における推進力、図5に電流位相と水平方向の位置関係における浮上力を示す。図4、図5共に、安定点を黒、浮上部重量と釣り合う点を赤の線で示す。また、図6に赤線状の推進力、図7に安定点と浮上支持荷重の位相差を示す。

図4から電流位相と水平方向の位置関係において、安定点は今回の解析範囲では電流位相、水平方向の位置関係に対して1つ存在する。また、安定点は直線状で移動し、安定点より電流位相が小さいと推進力は-、大きいと+と示されている。以上のことから直線状に移動する安定点を基準に位相をずらすことにより、前後への推進制御を行うことが可能であると考えられる。図6から前進時の推進力は式(2)、後進時の推進力は式(3)で表される。

$$F = A \sin 2\pi \left(\frac{x}{\lambda} + \phi \right) + \alpha = 0.0452 \sin \left\{ \frac{2\pi x}{15} + \frac{\pi}{2} \right\} + 0.794 \quad (2)$$

$$F = A \sin 2\pi \left(\frac{x}{\lambda} + \phi \right) + \alpha = 0.048 \sin \left\{ \frac{2\pi x}{15} - \frac{\pi}{2} \right\} - 0.787 \quad (3)$$

図5から安定点上の浮上力は6.6N以上であり、浮上支持荷重と釣り合う赤線まで浮上力は線形の変化を示す。以上のことから安定点上から赤線までの範囲において浮上が可能であると考えられる。図7から浮上力6.6Nで推進制御を

行うための前進時の安定点と浮上支持荷重の位相差は式(4)、後進時の安定点と浮上支持荷重の位相差は式(5)で示す。

$$\theta = A \sin 2\pi \left(\frac{x}{\lambda} + \phi \right) + \alpha = 7.545 \sin \left\{ \frac{2\pi x}{15} \right\} + 99.625 \quad (4)$$

$$\theta = A \sin 2\pi \left(\frac{x}{\lambda} + \phi \right) + \alpha = 7.63 \sin \left\{ \frac{2\pi x}{15} \right\} - 98.65 \quad (5)$$

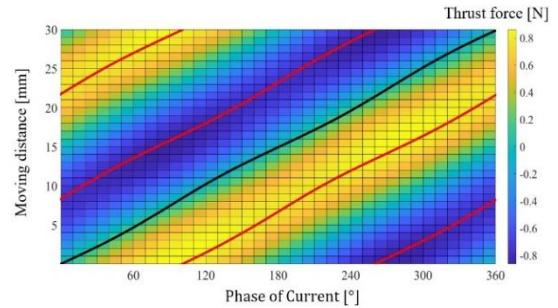


Fig. 4 Relationship of between stable point and phase of current (Thrust force)

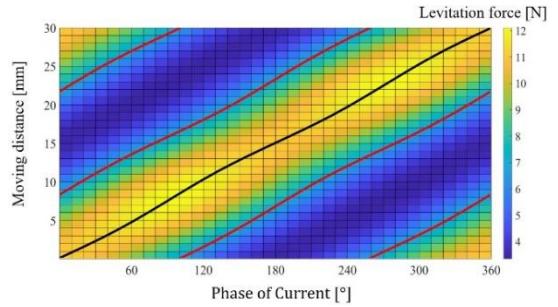


Fig. 5 Relationship of between stable point and phase of current (Levitation force)

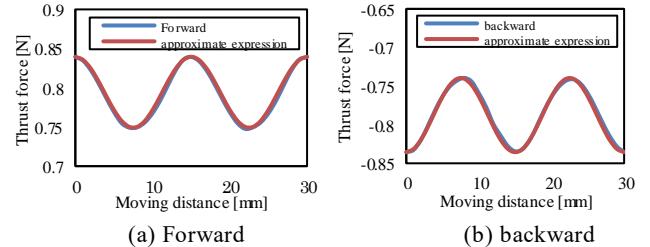


Fig. 6 Propulsive force when consistent with the floating support load

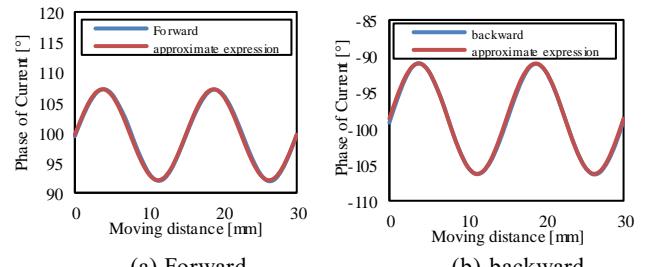


Fig. 7 Phase difference from the stability point when coincident with the floating support load

3.3 電流の大きさによる影響

3.3.1 解析方法

先の解析では 1A の三相交流の電流位相を操作することによって、推進浮上制御することができると考えられた。しかし、電流の値を固定することによって浮上力、推進力の上限と下限が決められてしまうと考えられる。物体の重量が増えた場合やより推進力が必要となった場合には、電流の増減を行うことでより制御の幅が広がる可能性について考察する。解析には FEM 電磁界解析ソフトウェア JMAG を使用し、エアギャップは 7.925mm、永久磁石と電磁石の位置関係が一周期となる 30mm 移動させて、1A の三相交流をコイルに 1 周期分流し、解析を行った。

3.3.2 解析結果・考察

図 8 に安定点の解析結果を示す。図 8 から電流の大きさによって安定点の電流位相に大きな変化はなく、直線状に存在しているため、安定点を基準とする制御が可能であると考える。

図 9 に前進時、図 11 に後進時の電流の大きさに対する推進力を示す。また、図 10 に前進時、図 12 に後進時の電流の大きさに対する推進力の平均値を示す。図 9 から前進時は電流が大きいほど推進力が大きく、図 11 から後進時は電流が大きいほど推進力が小さくなっている。そのため、図 10、図 12 の推進力を近似式にして利用することで、電流の大きさによって、推進力の制御が可能となると考えられる。式(6)に前進時、式(7)に後進時の電流の大きさによる推進力を近似式で表したものを見ます。

$$F = 0.0775t^2 - 0.9203i \quad (6)$$

$$F = -0.0556t^2 + 0.8498i \quad (7)$$

図 13 に前進時、図 14 に後進時の電流位相差の解析結果を示す。図 11 より、安定点と浮上支持荷重と釣り合う点との電流位相差は、電流の変化に対して、線形の変化が行っている部分と行っていない部分が存在する。前進時、後進時共に 0.5A～2.0A の範囲の電流と電流位相差の関係は、電流が大きいと電流位相差が大きくなるという線形の変化を常に示している。しかし、0.1A～0.5A の範囲の電流と電流位相差の関係では、電流が大きいと電流位相差が大きくなるという線形の変化を示しておらず、永久磁石と磁性体の水平方向位置により逆転することが確認できる。これは、電流の値が小さくなることにより、永久磁石の影響力の方が強くなつたため、原因であると考えることができる。図 12 より、後進時はマイナス方向に同様の性質がみられる。

よって、本機構において電流の変化による制御を行う場合、0.5A 以上で行うことが好ましいと考えることができる。

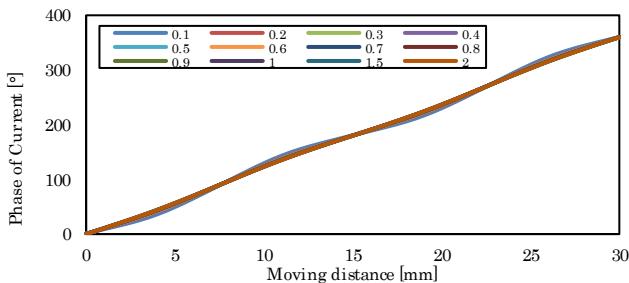


Fig. 8 Horizontal position and phase of the stability point depending on the magnitude of the current

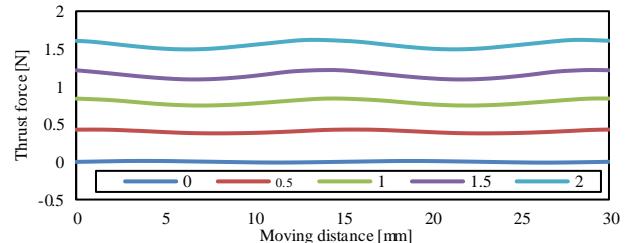


Fig. 9 Propulsive force generated in horizontal position due to magnitude of current (Forward)

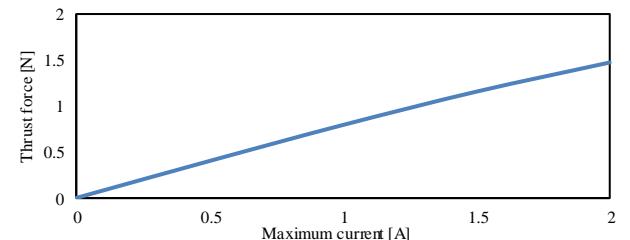


Fig. 10 Relationship between magnitude of current and propulsive force (Forward)

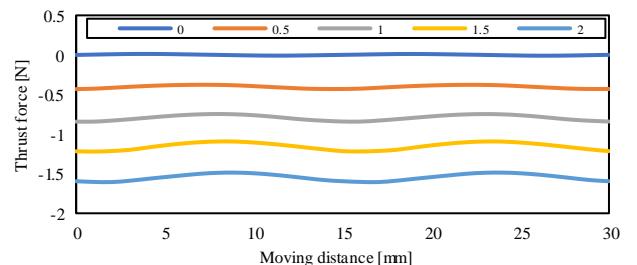


Fig. 11 Propulsive force generated in horizontal position due to magnitude of current (backward)

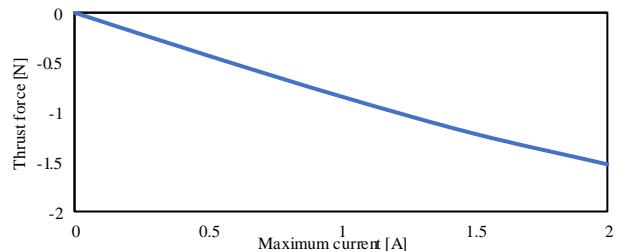


Fig. 12 Relationship between magnitude of current and propulsive force (backward)

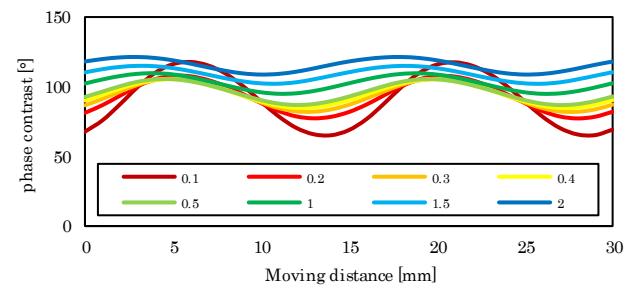


Fig. 13 Current phase difference when balanced with the floating support load, depending on the magnitude of the current (Forward)

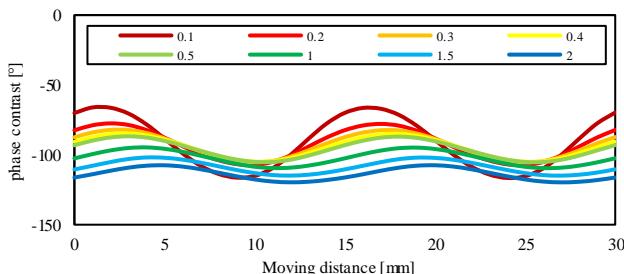


Fig. 14 Current phase difference when balanced with the floating support load, depending on the magnitude of the current (backward)

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キ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、ピッキ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、ピッキ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、水平方向センサーを利用してエアギャップ、電磁石と永久磁石との位置関係を得る。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。

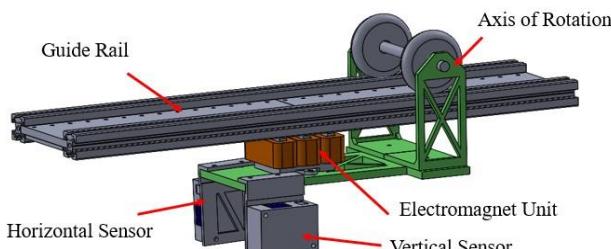


Fig. 15 Experimental device

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でゼロパワー浮上制御を利用して省電力での運用を目指した。解析データを基に鉛直方向、水平方向センサーからの位置情報を用いたゼロパワー浮上制御及び推進制御の制御を設計することができた。

今後は設計した制御を実機で実験を行い、ゼロパワー浮上制御及び推進制御の実現を目指す。

参考文献

- (1) 片岡 龍太, 岡 宏一, 原田 明徳, “非接触ベアリングレススライダの開発” 学士学位論文, 高知工科大学 (2019)
- (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) 勝部 雄士, 岡 宏一, 原田 明徳, “E形鉄心を用いたベアリングレスリニアスライダのゼロパワー浮上制御” 学士学位論文, 高知工科大学 (2021)
- (4) 富田 将広, 岡 宏一, 原田 明徳, “非接触給電磁気浮上リニアスライダーにおける3相リニアアクチュエータ” 修士学位論文, 高知工科大学 (2018)
- (5) 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
- (6) 石野 裕二, 高崎正也, 水野 育, “柔軟な強磁性体を利用したゼロパワー磁気サスペンションの開発” 第 51 回自動制御連合講演会
- (7) 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 卷 5 号 p. 447-454