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

Zero-power levitation control of a bearingless linear slider using an E-type iron core

システム工学群 機械・航空システム制御研究室 1220046 勝部 雄士

1 諸言

近年、半導体などのクリーンな環境を必要とする製造工程 で利用される搬送装置からの塵埃を抑えるために、機械的な 接触のない磁気浮上装置を用いることは有用である.例とし て、天井のスペースを有効活用できる懸架式の搬送装置とし て吸引力を用いた磁気浮上リニアスライダが実用化されて いる.

このような磁気浮上スライダとして, E 形鉄心を用いて推 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 リングレスリニア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.

本研究では、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を応用することによ り消費電力の低減を目指す.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、ゼロパワー浮上の設計を行い、 その可能性を検討したので、これを報告する.

2 ゼロパワー浮上

2.1 ゼロパワー浮上原理

ゼロパワー浮上を実現するには、永久磁石の吸引力が浮上 支持荷重と等しくなる位置で浮上体を保持しておく必要が ある.荷重が変化した場合は電磁石を用いて距離を変化させ ることによって浮上位置を変化させ、永久磁石の吸引力とつ り合わせる.荷重が大きくなり永久磁石の吸引力を大きくす るためには、電磁石に流す電流を大きくして距離を短くする 必要があり、吸引力を弱めるためには電磁石に永久磁石の磁 極と逆方向に磁力を発生させるような電流を流して距離を 長くするといった制御を行う.この制御方法により定常状態 で電磁石に必要な電力が0となり、消費電力を抑えることが 期待できる.

2.2 制御方法



Fig.1 Zero Power controller

Table 1 Symbol description

и	Current for apply to EMcoil	Α	coefficient matrix
x	state variable (displacent,velocity)	В	input matrix for the equation of state
<i>K</i> ₁	proportional gain	С	output matrix
K_2s	derivative gain	D	disturbance vector
$\frac{K_3}{s}$	integral gain	у	output (displacent,velocity)
f	disturbance	p	output of an integrator
Ζ	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 が出来る.

3 FEM 解析

浮上体と永久磁石の位置関係において,推進力が発生していない0[N]の位置で浮上体は静止する.本研究で行うゼロパワー浮上では推進力が0[N]の位置と吸引力が浮上支持荷重と等しくなる位置が必要なため,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,電流を流さずに解析を行った.

図3に推進力の解析結果を示す.エアギャップの変化によって推進力は変化せず,すべての水平方向の位置において推進力が0[N]であることが確認できた.よって,どの水平方向の位置においても,ゼロパワー浮上が可能であると考えられる.

図 4 に浮上力の解析結果と実験装置の浮上支持荷重を示 す. 浮上力は周期的に変化し、浮上支持荷重と吸引力が等し いエアギャップは 8.4[mm] 程度であることが確認できた.よ って、ゼロパワー浮上可能なギャップ方向の位置は水平方向 の位置によって変化し、8.4[mm]程度であると考えられる.



Fig.2 Thrust force when moving horizontally at each air gap



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

4 ゼロパワー浮上実験

4.1 実験方法

使用した実験装置を図4に示す.エアギャップと水平方向の位置は3章の解析結果より、エアギャップは8.4mm程度の位置で行った.実験装置を用いて先行研究で行ったPD制御とゼロパワー浮上制御で積分器による影響を確認するため比較実験を行った.安定点で浮上制御するために、E形鉄心のコイルに進行方向の逆側から三相交流の位相がsin30°,sin270°,sin150°の電流を印加し、浮上制御により安定浮上を行った.安定浮上後は50[g]の重りを外乱として加え、エアギャップと電流の測定を行った.



4.2 実験結果と考察

図5にPD制御時の,図6にゼロパワー浮上制御時のエア ギャップの測定結果示す.また,図7にPD制御時の,図8 にゼロパワー浮上制御時のコイルの印加の測定結果を示す. 図9にゼロパワー浮上時の外乱に対するエアギャップ,図10 に外乱に対するコイルの印加測定結果を示す.

図 5,図 6 のエアギャップの測定結果について着目すると, PD 制御は中心 8.355[mm]に振幅 0.015[mm],ゼロパワー浮上 制御は中心 8.52[mm]に振幅 0.035[mm]の継続的な振動が確認 できた.

図 7, 図 8 の電流の測定結果について着目すると, PD 制御 は進行方向に対して前方コイル,後方コイルは中心 0.07[A]に 振幅 0.02[A], 中央コイルは中心-0.18[A]に振幅 0.06[A]の継続 的な振動が確認できた.また, ゼロパワー浮上は進行方向に 対して前方コイル,後方コイルは中心 0[A],振幅 0.05[A], 中央コイルは 0[A],振幅 0.15[A]の継続的な振動が確認できた.

図 9, 図 10 の外乱に対してのエアギャップ,電流の測定結 果について着目すると,エアギャップは外力と同じ方向 へ 変位してピークに達した後,初期状態の位置より小さい位置 で安定した.電流は進行方向に対して前方コイル,後方コイル は+,中央のコイルは-のピークに達した後,初期状態と同じ く 0 を中心とした振幅に安定した.

図5、図6から周期が短く、振幅が小さい継続的な振動が 確認できた.この振動は実験機の摩擦によって生じていると 考えられるため、ゼロパワー浮上の評価の際には無視できる. 電流の振幅は振動に伴い発生しているため、振動を無視した 場合, 図 7 から PD 制御では進行方向に対して前方コイル, 後方コイルに流れる電流は0.07[A],中央コイルは-0.18[A]と なり、電流が常に流れていると考えることができる. それに 対して,図8からゼロパワー浮上制御ではすべてのコイルに 流れる電流は0[A]となるため、電流が常に流れていないと考 えることができる. 上記のことから積分器を局所フィードバ ックすることで定常状態における消費電力は0となりゼロ パワー浮上が可能になったと考えられる.また,外乱に対し 増加した重りと釣り合うために, エアギャップは変位後, 変 位前の位置よりも小さい位置で安定し, 電流は変位後, 変位 前と同じように振幅の中心は0[A]となった.よって、本制御 方法では、外乱が加わった場合でもゼロパワー浮上が可能で あると考えられる.



0 0.2 0.4 0.6 0.8 Time [s]

Fig.7 Current applied to each coil during PD control



Fig.8 Current applied to each coil during zero-power levitation control



Fig.9 Air gap during zero-power levitation control against external disturbance



Fig.10 Current applied to each coil during zero-power levitation control against external disturbance

5 結言

本研究では、E形鉄心を用いたべアリングレススライダの ゼロパワー浮上を提案し、解析でゼロパワー浮上に必要な水 平方向位置とエアギャップを確認し、外乱に対する耐性含め ゼロパワー浮上実験を行った.結果、ゼロパワー制御による 浮上体の浮上に成功し、外乱に対する耐性も確認できた.

今後はゼロパワー浮上制御システムのパラメータを調節 することで電流の振幅を減少させ、さらなる消費電力の低減 を目指す.

参考文献

- (1) 片岡 龍太,岡 宏一,原田 明徳,"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—FEM 解析と実験 による検証—"第17回「運動と振動の制御」シンポジ ウム
- (2) 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)
- (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) 石野裕二,高崎正也,水野毅,"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