

# 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-

## Bearingless linear slider using E shaped iron core unit - Suspension system with 4 units -

知能機械工学コース

機械・航空システム制御研究室 1245010 片岡 龍太

### 1 緒言

半導体製造において、シリコンウエハ上に各種素子や配線を作りこむ前工程では、高 cleanliness が要求される。そこでの搬送装置としては、機械的な接触をなくし塵埃を抑えることが可能な磁気浮上搬送装置が用いられることも多く、天井に軌道を配置した吸引力を用いる磁気浮上リニアスライダが実用化されている<sup>(1)</sup>。

一般的な磁気浮上リニアスライダの構成は、スライダを浮上させる磁気浮上機構と、浮上したスライダを推進させるリニアアクチュエータ機構の2つの機構から構成される。リニアアクチュエータにはリニアモータが用いられ、浮上方向に推進力の10倍程度の吸引力が働くことが知られており、これを浮上力として利用することが提案されている<sup>(2)</sup>。また、回転系モータにおいては、回転子を非接触で支持する磁気軸受機構と、磁気軸受と回転トルクを発生させる駆動部を一体化させたベアリングレスモータが提案されている<sup>(3)</sup>。

本研究では電磁石にE型鉄心を用いて浮上力と推進力を得るリニアスライダの開発を行う。E型鉄心を用いることにより電磁石部を小型化できると考えている。回転系ベアリングレスモータにおいてトルクを推進力、軸支持力を浮上力に置き換えたベアリングレスリニアスライダについて、FEM解析と自由度を減らして簡略化した実験により、電磁石ユニットの特性を確認した。その後、完全に非接触となる4点支持での実験により、実現性の検証を行う。

### 2 ベアリングレスリニアスライダの基本構造

ベアリングレスリニアスライダに用いる電磁石ユニットとガイドレールを図1に示す。可動子(スライダ)にはE型鉄心の各突極にそれぞれ独立したコイルを巻いた構造を用いる。固定子のガイドレールには永久磁石をギャップ面に対してN極S極が交互になるように配置する。この永久磁石によって主磁束を発生させ、各突極に巻いたコイルに電流を印加することで磁気回路を制御する。

推進については3つのコイルに三相交流を印加することで通常のリニア同期モータと同様の原理で推進を行う。そのため、鉄心の突極とガイドレールの永久磁石の磁極数が3:4の比になるように電磁石間の鉄心の幅を決定した。浮上に関してはギャップ方向に働く吸引力(浮上力)と重力のつり合いにより、平衡位置を保つように電流の制御を行う。3つの突極に働く浮上力の総和は互いを相殺するため一定となるが、磁気回路の状態によって各突極に発生する浮上力が異なるため、ピッチングトルクが発生する。

本リニアスライダは上記の浮上・推進兼用の電磁石ユニットを4つ用いる。今回、案内方向とヨーイングは復元力により受動安定となる機構を考え、浮上方向、ピッチング、ローリングの3自由度の能動制御を行う。ユニットを4つ用いる場合は四点支持式磁気浮上と考えられるため、三相交流の大きさを変化させることによって、ピッチング、ローリングを各ユニットの浮上力で制御可能である。次章の解析ではまず1つの電磁石ユニットの推進力、浮上力、ピッチングトルクの解析を行った。

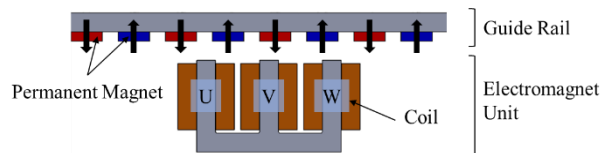


Fig1 Electromagnet unit and guide rail

### 3 FEM解析

提案するリニアスライダにおいて、浮上と推進が可能であること、および、ピッチングトルクの制御がユニット単位で可能であるかを確認するために解析を行った。解析には電磁場解析ソフト JMAG を使用した。推進力の評価方法として、時間に対する安定点の変化を確認した。ある電流の位相におけるガイドレールと電磁石ユニットの推進方向の位置関係を考えたとき、推進力が0となる移動方向の平衡点が存在する。この平衡点において推進力が推進方向に対して正から負になる点、つまり復元力が働く点を安定点と呼ぶ。三相交流の位相を変化させるにつれて、安定点が滑らかに推進方向に変化するかを確認した。解析モデルはエアギャップが9mm、1Aの三相交流を1周期分流した条件で解析を行った。

図2に推進力、浮上力、ピッチングトルクの解析結果を示す。安定点を黒、浮上部重量と釣り合う点を赤の線で示している。図2(a)の推進力の解析結果は安定点が推進方向に滑らかに変化しており、推進原理単体は既存のリニア同期モータと同じであるので安定点上で一定の推進力が得られるのが分かる。また、図2(b)の浮上力の解析結果から得られた浮上部重量つり合い点について着目すると、安定点がつり合い点の間にあることから、計画している1Aの印加電流で浮上可能であることが分かる。図2(c)に示すピッチングトルクは3つの電磁石のW相側が上に傾く場合を正としており、安定点で正負が連続的に変化することが確認できた。

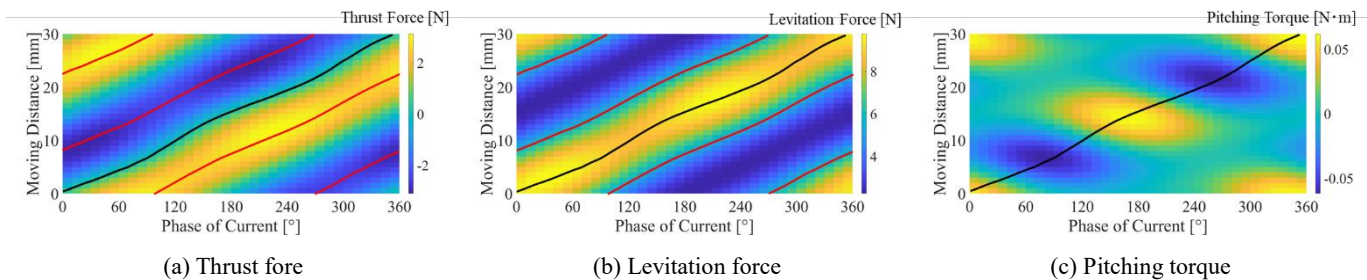


Fig 2 Relationship of between stable point and phase of current

図 3 には次章で示す実験装置において、安定点上でのピッチングトルクによって発生する変位の計算結果を示す。変位は FEM 解析によって得られた浮上力と、実験で用いた比例ゲインの値から計算した。三相交流 1 周期で約 0.6mm 程度の振動が 2 回見られる結果となった。

解析結果より、三相交流は全相同じ割合で変化させれば安定点の位置は変化しないため、電磁石ユニット 1 つで浮上、推進が可能であることが確認できた。また、ピッチングトルクの制御が必要であることも確認した。

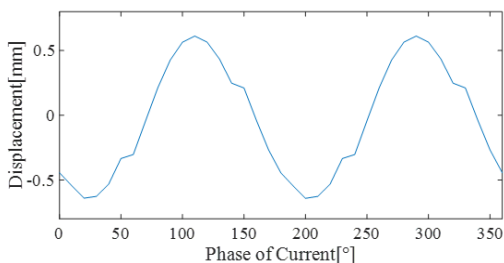


Fig 3 Displacement by pitching torque

#### 4 試験機による実験

##### 4.1 試験機の概要

1 つの電磁石ユニットにおける浮上、推進の特性を確認するため、試験機による実験を行った。図 4 に示すようにガイドレールに車輪のついたレバーアームを懸架し、電磁石ユニットとレーザーセンサをアームに固定した。補償方法は PD 制御を用いた。今回の機構では図 3 に示されたように、推進に伴ってピッチングトルクが発生する。このピッチングトルクは車輪シャフト軸を中心とした回転トルクとして、浮上力に影響する。よって安定化のための浮上力はこのトルクの影響を受け、ユニットの推進とともに浮上位置が変化すると考えられる。

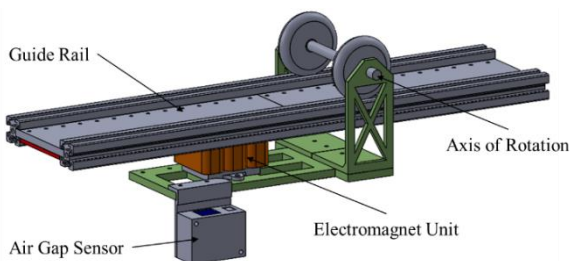


Fig 4 Test linear slider

##### 4.2 推進・浮上実験

製作した特性試験機を用いて浮上、推進実験を行った。電磁石ユニットのコイルに三相交流の位相が  $0^\circ$  のときの電流を印加し浮上制御により安定浮上させた後、約 5 秒後に三相交流の位相を進めて推進を行った。

図 5 に変位の測定結果を示す。静止時には平衡点の 9mm 程度で安定しているが、推進を開始した約 5 秒後からは 0.4mm 程度の振動がみられる結果となった。今回印加した三相交流の周期は 6.28 秒であることから、1 周期分の区切りの線を重ねている。図 3 の FEM 解析結果からの変位計算結果と比較すると、実験結果と周期、振幅が一致する。このことから一つの電磁石ユニットにはピッチングトルクが発生することが確認でき、その能動制御が必要であると考えられる。

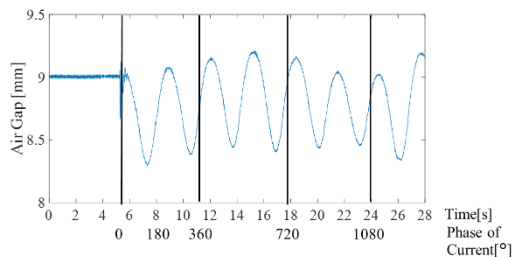


Fig 5 Result of levitation and thrust experiment

##### 5 四点支持機構による実験

電磁石ユニットを 4 つ用いて、完全な非接触で推進、浮上可能な試作機を製作、浮上・推進実験を行い、提案するベアリングレスリニアスライダの実現性を確認した。四点支持機構のプラットフォームを図 6 に示す。ガイドレールを並列に並べ、進行方向に対して前後でピッチングトルクを相殺するように  $90^\circ$  の位相差を持った電磁石ユニットを配置した。レーザーセンサで 4 点の変位を測定し、重心の変位、ローリング、ピッチングに換算して 3 自由度の制御を行う。図に楕円で示したプラットフォーム上の場所に荷重を追加してステップ応答を確認した。

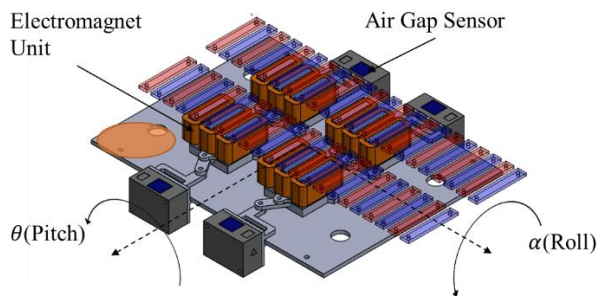


Fig 6 Suspension system

ステップ応答の結果を三相交流の位相が $0^\circ$  の場合を代表して実験結果を図7に示す。(a)には前後の電磁石ユニットが同位相の場合、(b)にはピッチングトルクを相殺する場合の結果を示す。(b)は(a)でみられたピッチングトルクを小さくすることができており、ピッチングトルクを相殺することは外乱に対しても有効であることが分かる。

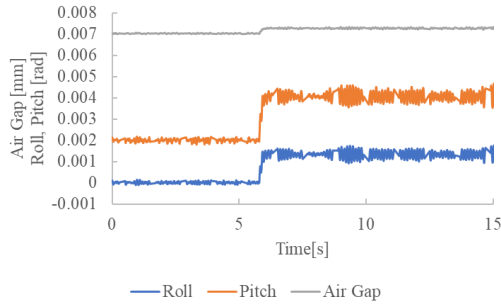


Fig 7(a) Step response(0deg)

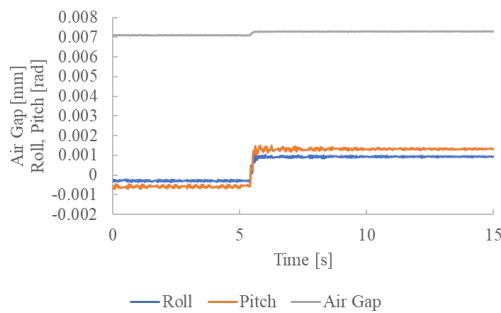


Fig 7(b) Step response(0deg-90deg)

次にピッチングトルクを相殺する構成で浮上・推進実験を行った。エアギャップ、ロール、ピッチの測定結果を図8に示す。3秒後から推進を行うと発散することなく完全非接触での浮上・推進に成功したが、ピッチングトルクに振動がみられる結果となった。

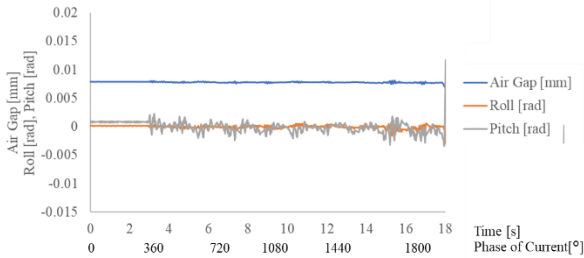


Fig 8 Result of levitation and thrust experiment of 4units suspension system

## 6 結語

提案した浮上機構と推進機構を一体化したベアリングレスリニアスライダにおいて、FEM解析と実験の結果から1ユニットで浮上と推進が可能であることと、ピッチングトルクの影響を確認した。次にFEM解析と1ユニット特性試験実験から得られたピッチングトルクなどの検討内容に沿って完全非接触で浮上・推進可能な4点支持式磁気浮上による試作機の製作と実験により実現性の検証を行った。浮上・推進が可能であることは確認できたが、ピッチングトルクに振動がある等の課題がみられた。今後はゲインチューニングや機構の再検討の必要がある。

## 文献

- (1) 森下明平 “磁気浮上搬送装置” (1999) 計測と制御
- (2) 一般社団法人電気学会磁気浮上技術調査専門委員会編 “磁気浮上技術の原理と応用” (2018) 科学情報出版株式会社 p.183
- (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.137
- (4) 千葉明, 深尾正, “ベアリングレスドライブの開発動向” (2001) 電気学会論文誌 D(産業応用部専門誌)
- (5) Rafal P.JASTRZEBSKI, Pekko JAATINEN, Olli PYRHONEN ”Modeling and control design simulations of a linear flux-switching permanent -magnet-levitated motor”(2017)
- (6) 赤津観 “史上最強カラー図解 最新モータ技術のすべてがわかる本” ナツメ社(2018)
- (7) 富田将広, “非接触給電磁気浮上リニアスライダーにおける3相アクチュエータ” 高知工科大学, 修士論文(2018)
- (8) “Resonance Effects for a Crack Near a Free Surface”, Transactions of the ASME, Journal of Applied Mechanics, Vol. 51, No. 1 (1986), pp. 65-69.