

卒業論文要旨

非接触ベアリングレススライダの開発

Development of contactless bearingless slider

システム工学群

機械・航空システム制御研究室 1200047 片岡 龍太

1. 緒言

昨今では高潔度が要求される半導体や薬品製造過程の輸送用として、磁気浮上式搬送装置が利用されている。磁気浮上技術を用いることで塵埃の発生がないことや、保守性が良いなどの利点がある。懸架式であれば天井のスペースを有効活用できることから、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⁽¹⁾。

磁気浮上リニアスライダの構造は役割から、磁気浮上機構とリニアアクチュエータ機構の二つの部分に分けられる。磁気浮上機構はスライダを非接触で浮上させる機構であり、リニアアクチュエータ機構はスライダを推進させる機構である。推進機構として、リニア誘導モータやリニア同期モータの原理が用いられる。これらの原理のアクチュエータは推進力に対して数倍の吸引力が働くことが知られている。この吸引力を浮上力として利用し、リニアモータに磁気浮上の機能を統合させた非接触リニアアクチュエータ機構が考えられている⁽²⁾。

本研究では、推進力を発生させる磁束と浮上力を発生させる磁束を共有した構造を持つベアリングレスリニアスライダの開発を行った。E字型の鉄心一つだけで推進と浮上を行うことができ、ピッチングトルクが発生することを電磁界解析ソフトウェアを用いて確認した。実験機作成のための設計と制御性の検討を行った。

2. 推進、浮上機構

2.1 駆動機構

図1に示すように、電磁石ユニットである可動子(スライダ)にはE型突極鉄心の三つの歯に、それぞれ一つのコイルを巻いた電磁石を用いる。固定側のガイドレールは鉄板に永久磁石の上下方向の向きを交互に取り付けたもので、これによ

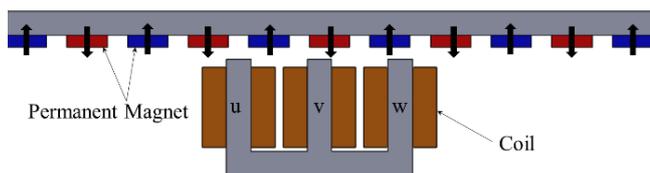


Fig. 1 Electromagnet and rail

て主磁束を発生させる。固定用の鉄板はバックヨークとして機能する。可動子の相と固定子の極の比が 3:4 になるように装置の寸法を決定した。

推進原理は既存のリニア PM 同期モータと同様である。三つのコイルに三相の交流電流を流すことで推進する。上下方向については三つの歯に働く吸引力と反発力のつり合いにより、推進方向垂直の力が一定に保てると考えた。吸引力の変化は三つの歯の総和を考えると相殺するようになっている。

2.2 全体の構想

本リニアスライダは図1に示す浮上、推進兼用電磁石ユニットを四つまたは二つ用いる。図2(a)のように四つ用いる場合にはピッチングとローリングを浮上力で制御可能であるが、四つの浮上機構が必要である。図2(b)のように二つの場合、装置は簡素になるが電磁石ユニットでピッチングの安定化が必要となる。今回の解析ではまず一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。

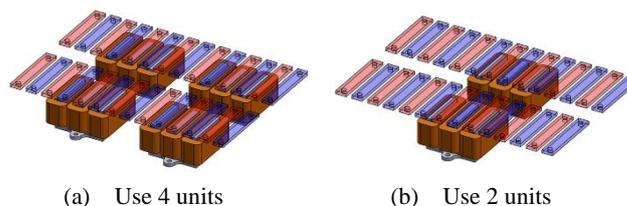


Fig 2 Placement pattern

2.3 推進浮上原理

推進原理は既存のリニア PM 同期モータと同様である。三つのコイルに三相の交流電流を流すことで推進する。上下方向については三つの歯に働く吸引力と重力とのつり合いにより、平衡位置付近で一定に保てると考えた。吸引力の変化は三つの歯の総和を考えると相殺するようになっている。

3. シミュレーション

3.1 FEM 解析

提案するリニアスライダにおいて、推進と浮上が可能であり、ピッチングトルクが発生す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 を使用した。

図 1 において 10 mm の幅の永久磁石を 10 mm おきに間を空けて配置し、コイルの巻き数は 180 回として、最大値が 4 A の三相交流電流を流して解析を行った。

3.2.1 推進力の解析

推進力の評価は安定点の変化を確認した。任意の位相の電流を流すときに、推進力が進行方向に対して正から負に変化する位置を安定点と呼び、スライダはこの位置で静止する。推進力の解析結果を図 3 に示す。安定点の変化を黒の線で重ねて示している。0° から 360° までの位相で安定点がほぼ線形に遷移している結果となった。

3.2.2 浮上力の解析

浮上力の解析結果を図 4 に示す。リニアスライダは安定点に沿って推進するため、前述の安定点を重ねて示している。図 3 は安定点上で浮上力一定で推進できることを示している。

3.2.3 ピッチングトルクの解析

一つの電磁石ユニットでは E 字型鉄心の各歯で発生する吸引力が異なるため、ピッチ方向にトルクが発生する。図 5 にピッチングトルクを計算した結果を示す。先と同様に安定点を重ねて表示している。安定点上でピッチングトルクが正負に変化する結果となり、これを 0 にするような制御が必要だと考えられる。

3.3 試作機的设计

実際に試作スライダを製作するために詳細な形状と起磁力を解析によって決定した。使用しようと考えているモータドライバでは 4 A の電流を得られないため、計画する交流電流の最大値を 1 A とした。電流を小さくすると起磁力が変化し、安定点が線形に変化しなくなる。1 A でも安定点が線形に遷移する巻数を求めるため、コイルの巻き数を増加させた 200 回、300 回巻きで推進力と安定点の評価を行った。また、磁極ピッチを決定するためにガイドレールの永久磁石を配置する間隔を変更した解析も行った。永久磁石を交互に隙間なく並べた配置(磁極ピッチ 10 mm)、1 個分ずつ間を開けた配置(磁極ピッチ 20 mm)、その中間の半分だけ幅を開けた配置(磁極ピッチ 15 mm)の 3 パターンで解析を行った。このとき、各磁極ピッチに合わせて電磁石の鉄心幅も変更している。磁極ピ

ッチとコイルの巻き数を変えた推進力の解析結果を図 6 に示す。300 回巻きであれば磁極ピッチ 10 mm と 15 mm において安定点がほぼ直線で変化する結果となった。磁極ピッチが 15 mm の場合は歯幅間に直径 0.5 mm の巻き線を 300 回以上巻くことが可能である。以上の解析によって試作する電磁石ユニットとガイドレールの諸元は表 1 に示すように決定した。

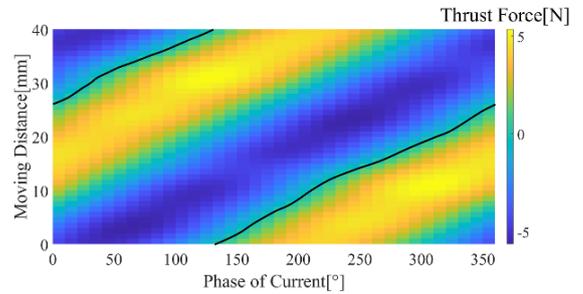


Fig.3 Relationship of between thrust force and phase of current

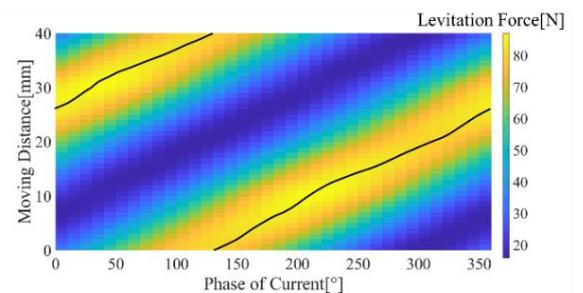


Fig.4 Relationship of between vertical attraction and phase of current

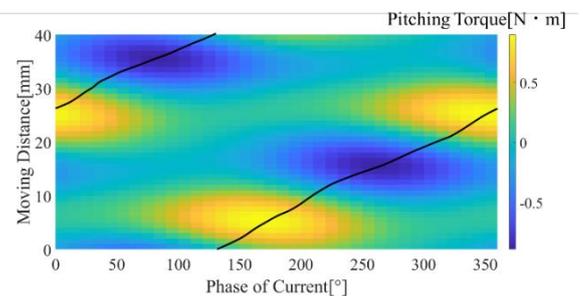


Fig.5 Relationship of between pitching torque and phase of current

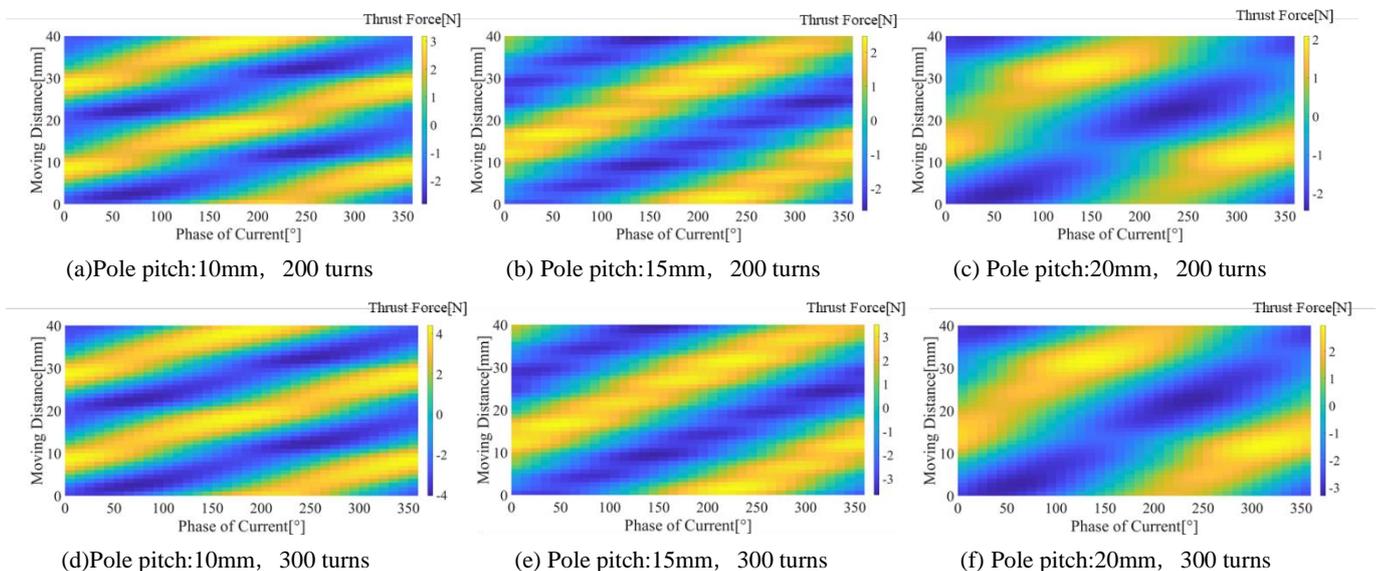


Fig.6 Relationship of between thrust force and phase of current

Table .1 Design specification of electromagnet and rail

Iron core width	46mm	Rail pole pitch	15mm
Slot width	20mm	Magnet width	10mm
Tooth height	21mm	Magnet thickness	3mm
Turns per coil	300	Current	1A

3.4 制御性の検討

推進させる際に発生するピッチングトルクの制御性について検討を行った。ピッチングトルクの安定性を調べるため、電磁石ユニットを $+1^\circ$ と -1° 傾いた状態で解析し、その差を計算した。計算結果を図8に示す。すべての位相と位置関係において正の値となり、ピッチングトルクには安定点が存在せず、不安定であるため、能動的な制御が必要であると考えられる。

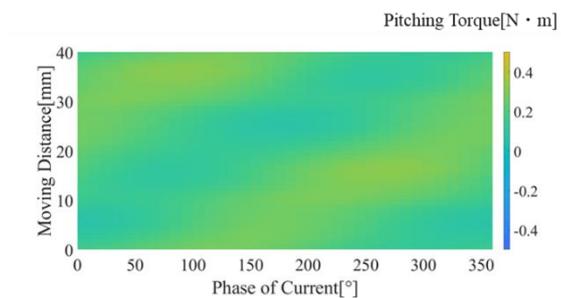


Fig.8 Pitching torque deviation

今回のリニアスライダにおいて、用いる電磁石ユニットが二つ以下の場合にはピッチングの安定化が必要になるが、吸引方式の磁気浮上システムであるので上下方向の制御も必要である。よってピッチ方向と上下方向の2自由度の制御が可能な電流を検討した。三相のうち、2相以上を変化させることで浮上力、ピッチングトルクを独立して制御できることが分かったが、三相のバランスを変えることになるため、同時に推進力の安定点も変化してしまう。このことから、電磁石ユニット一つのみでの使用は難しく、提案したようにユニット複数個を用いる機構が望ましいと考えられる。

4. 実験装置の作成

電磁石ユニット一つで推進と浮上が行えることを確認するため、図9のような実験装置を製作した。ガイドレールに懸架するような形で電磁石ユニットをレバーアームに固定することで、ピッチングの制御が不要となり、浮上力のみでの制御でよい。完全な非接触ではないが、本装置で推進、浮上ができれば、この電磁石ユニットを四つ用いることで提案する非接触リニアスライダが実現できると考えている。

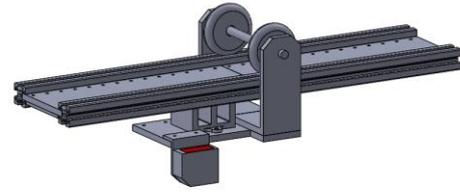


Fig.9 Propulsion and levitation experimental device

5. 結言

電磁場解析ソフトを使用して、推進と浮上を統合したリニアスライダの検討を行った。また、実験装置の設計と製作を行った。今後は電磁石ユニット四つを用いた機構の作成と実験を行っていく。

文献

- (1) 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
- (2) 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
- (3) 富田将広,”非接触給電磁気浮上リニアスライダにおける3相アクチュエータ”,高知工科大学, 修士論文(2018)
- (4) Rafal P.JASTRZEBSKI,Pekko JAATINEN,Olli PYRHONEN ”Modeling and control design simulations of a linear flux-switching permanent -magnet-levitated motor”(2017)