

| | |
|---------|---|
| 氏名 | 松田光平 |
| 学位の種類 | 博士(工学) |
| 学位記番号 | 工博甲第384号 |
| 学位授与の日付 | 平成27年3月25日 |
| 学位授与の条件 | 学位規則第4条第1項該当 |
| 学位論文題目 | UKFによるセルフセンシング磁気浮上系の磁気飽和に対する補償 |
| 論文審査委員 | 主査 教授 坂本哲三 " 黒木秀一 " 小森望充 " 三谷康範 " 本田崇 |

学位論文内容の要旨

セルフセンシング吸引形磁気浮上系の課題は、制御系の安定余裕を確保することであるが、安定余裕の確保は信頼性のために重要な指標であり、正確なギャップの推定と適切な制御設計により達成される。振幅復調によるギャップ推定は様々な非線形要素によって影響を受ける。要素の一つとして吸引形磁気浮上系の電磁石と鉄心に用いる磁性材料の磁気飽和がある。磁気飽和が起こると、いわゆる磁気抵抗が変動する。この変動が推定値の誤差となる。特に浮上対象へ負荷が加わる時などの高い磁束密度の時にその影響が大きく現れる。

本研究は、セルフセンシング吸引形磁気浮上制御系の磁気飽和に対する補償方法を行い、実験により安定性を評価することを目的とする。まず実験的に求めた測定結果より自己インダクタンスと電流の平均値を用いてギャップが一意に求まらないことを示す。この問題に対して2つの方法を提案する。ひとつは、自己インダクタンスと電流の平均値からギャップが一意に求まる範囲に限定してギャップ推定する方法である。この方法は、範囲内で自己インダクタンスと電流の平均値からギャップを出力するモデルを求め、このモデルで推定し、制御する方法である。もうひとつは、運動モデルを用いる方法である。運動モデルを仮定することにより、範囲の限定なしにギャップを推定することが出来る。運動モデルを考慮した推定を行うためにアンセンテッドカルマンフィルタを用いる。2つの方法を実験機に実装し、制御系の性能評価を行う。

本論文は第7章で構成される。第1章は序論であり、本文は第2章から始まる。第2章は、吸引形磁気浮上系およびセルフセンシングの概要と原理について述べる。ここで、本論文で扱う吸引形磁気浮上系の構成およびモデルを示した後、PWMアンプのキャリアを利用したセルフセンシング吸引形磁気浮上系の構成と比較する。またPWMアンプにより電磁石に加えられる電圧や変位センサの代わりになる変位推定の原理を示す。

第3章では本論文で用いる実験機について示す。

第4章では、磁気飽和の影響により自己インダクタンスが減少する特性について3次元有限要素法を用いた磁界解析を行った結果を示す。磁界解析結果より自己インダクタンスの電流に対する特性を明らかにする。

第5章および第6章ではそれぞれ異なる磁気飽和に対する補償方法を提案する。第5章は、磁気飽和に対して検出範囲を限定したギャップセンシング法を提案する。この章では、まず自己インダクタンスの測定方法を示す。この測定は離散フーリエ変換を用いる。そしてその測定方法により実験的に得られた自己インダクタンスとギャップとPWMアンプの1キャリア周期における電流の平均値の関係を示す。その結果からギャップが自己インダクタンスと電流の平均値を用いて一意に求まらないことを示す。次に補償範囲を限定した補償方法を提案する。そして実験機を用いて提案するセルフセンシング浮上の有効性を確かめる。実験では変位推定実験およびセルフセンシング浮上実験を行う。浮上実験より感度関数を測定し、安定余裕が確保されていることを示す。

第6章では、磁気飽和に対して運動モデルを用いてギャップを推定する方法を提案する。運動モデルを仮定することにより、前時刻の浮上対象の位置情報から次の時刻への位置情報を基にギャップ推定する。この運動モデルをセルフセンシングの手順に組み込むためにアンセンテッドカルマンフィルタ(UKF)を用いる。運動モデルと脈動電流の時間微分値、および電流の平均値の関係より構築した観測モデルよりUKFを構成し、ギャップを推定する。実験機を用いてこの提案方法の実装を行い、評価をおこなう。そして、その実験結果より、提案方法が磁気飽和の存否にかかわらず広い範囲でギャップをセンシングすることが可能であることを示す。

最後に、第7章は得られた結果のまとめである。

学位論文審査の結果の要旨

吸引形磁気浮上方式は、名古屋の地下鉄で運行されているリニアモータ推進車両に用いられている浮上方式、あるいは中国の上海で運行されているドイツのトランスラピッドと呼ばれる車両の浮上方式である。また、回転機における非接触方式のベアリング技術としても利用され、高速回転数での駆動を可能にする。この方式は電磁石と強磁性体でできている吊り下げ部の間に生じる吸引力を制御して浮上するものであるが、制御には電磁石と吊り下げ部とのギャップ、そして電磁石の電流の情報が必要になる。電流センサはコストも低く、設置についても問題はないが、ギャップセンサはコストが高いだけでなく、その設置も実用上の問題をはらんでいる。すなわち、ギャップセンサを不要にすることは大きな技術革新であり、したがってこれまで多くの研究が行われている。

セルフセンシング吸引形磁気浮上技術とは、ギャップセンサを用いない吸引形磁気浮上技術を指す。フィードバック制御のために用いるギャップの大きさを推定するには電磁石の電圧と電流を用い、ギャップの推定値と電流を用いて浮上制御を行う。ギャップセンサがないためハードウェアの構成が容易となり、故障の原因も少なくなることになるため、高信頼性を確保できるというメリットも生じる。

セルフセンシング吸引形磁気浮上系の大きな課題は、制御系の安定余裕を確保できることにある。ギャップの推定手法には、電磁石に生じる速度に比例する起電力を用いた状態推定オブザーバを用いる手法と、電磁石に含ませた高周波電圧によって生じる変圧器起電力を利用した振幅変調と呼ばれる、電磁石の自己インダクタンスの値を間接的に利用する手法が存在するが、安定余裕の点では振幅変調方式がより優れていると言える。しかし、装置を構成する強磁性体が引き起こす非線形現象としての磁気飽和は、これまでのセルフセンシング手法では対応ができず、従って強磁性体の線形領域のみしか利用できないので、運転に制限を受けるだけでなく、装置が大きくならざるを得ないという問題を抱えていた。

本論文は、電磁石用の電源に用いるPWMアンプの、キャリア周波数に従う電流の脈動成分を利用したセルフセンシング吸引形磁気浮上系について、新たなセルフセンシングの手法を提案し、その解析と実験結果を示すことで有効性を示している。論文は7章で構成されるが、第3章で実験機について述べ、第4章では、磁気飽和の影響により電磁石の自己インダクタンスが変化する特性について、3次元有限要素法の数値解析結果を示す。

第5章は、磁気飽和は考慮しているものの、その動作範囲に制限を設けた手法を提案する。実験機を用いて、提案手法の有効性を確かめる。また、浮上実験より感度関数を求め、十分な安定余裕が確保されていることを示す。

第6章では、磁気飽和の考慮できる、運動モデルを導入したギャップ推定方法を提案している。非線形のダイナミクスをもつ運動モデルと、制御電流およびPWM駆動に伴う脈動電流の関係より構築した観測モデルを構成し、これにアンセンテッドカルマンフィルタ(UKF)を適用してギャップを推定する手法について述べる。実験機により提案手法の評価をおこない、提案方法が磁気飽和領域を含む広い動作範囲でギャップを正確にセンシングすることを示す。

以上のように、本論文はセルフセンシング磁気浮上に関して磁気飽和を起こしている状態でも機能する手法を提案し、理論的かつ実験的に実証したということにより、この分野への貢献は非常に大きく、博士(工学)の学位論文に値するものと考えられる。なお、本論文に関する審査会及び公聴会において、審査委員及び出席者から質問がなされたが、何れも著者によ

る的確な説明が行われた。

以上により、論文審査及び最終試験の結果に基づき、審査委員会において慎重に審議した結果、本論文が博士(工学)の学位に十分に値するものであるとの結論に達した。