

## 審査の結果の要旨

氏名 アーメド サルマン

本論文は、A compact magnetically levitated transverse flux permanent magnet linear synchronous motor---Surrogate assisted rapid design and suspension control---(磁気浮上で支持される小型横磁束形リニア同期モータの研究---サロゲートモデルに基づく高速設計と能動浮上制御---)と題し、以下の7章からなる。

第1章では、序論として、昨今の精密位置決め用の電磁アクチュエータ、永久磁石型リニア同期モータ駆動制御技術の動向と先行研究を紹介し、本研究の位置づけを説明している。

第2章では、非接触磁気支持による永久磁石横磁束形リニア同期モータとして、界磁側に強磁性体を持たない磁束貫通形永久磁石界磁板が、U字形電機子鉄心に挟まれた横磁束形リニア同期モータと電磁吸引形磁気支持が一体となった構成を提案している。このモータは大きな推力発生を可能としながら、支持の負担となる垂直吸引力が小さい。また、電機子磁極と永久磁石の組み合わせを工夫し、それらの最大公約数ができるだけ大きくなる構成を取ることで、大きな平均推力を保ちつつ推力脈動抑制が可能となる。また、リニアモータ永久磁石による復元力を利用し、構造的にヨーイングおよび左右変位に対する受動的安定性を持たせ、4巻線の吸引浮上電磁石で6運動自由度の非接触支持を可能とする、リニアモータ・吸引磁気浮上一体構造を提案している。

第3章は、横磁束形機のマルチ・フィデリティ・サロゲートモデルに基づく設計最適化を論じている。上記リニア同期モータは優れた性能を持つ反面、その特性算定に計算コストの大きな三次元磁界解析を要し、複数設計定数の最適化に膨大な計算時間を要する困難がある。基本的な実験計画法、応答曲面法などにより設計試行数を減らす試みは効果的だが、それにも限界はある。本章では、計算結果の信頼性は高いがコストも大きい三次元磁界計算を規範モデル、物理的洞察に基づき磁気回路を変形した近似二次元計算による発生力計算法を、計算結果の信頼性が低い安価なサロゲートモデルとした。このサロゲートモデルは計算の絶対値が合わないものの、設計パラメータに対する性能依存性の傾向は正しく表現できることが多いため、これら2種類の計算モデルを上手く組み合わせることで、必要計算量を劇的に減らしつつ最適設計の信頼性を確保できる。そして、この方法で、本研究後半で実験に用いる試験機を設計し、最適化されたリニアモータ性能を三次元解析で確認し、提案設計法の有用性と信頼の高さを検証している。

第4章は、横磁束形モータのディテント低減法として、電機子スロットと磁石を持つ同期機、さらに端効果のある永久磁石リニア機の、円滑な駆動・精密位置決めへの妨げとなるディテント力を、低減する設計法を論じている。このディテント力は設計定数への依存性が複雑で、傾向を正しく表現する前述の簡便なサロゲートモデル作成が難しい。そこで、最適設計変数探索に、確率的偏差分布情報を利用し、試行数を削減する Co-Kriging 法の適用を提案した。さらに、古典的空間高調波の基礎解析に基づく電機子群の進行方向配置の工夫により、リニアモータ固有の端効果に起因するディテント力を低減する方法も追究した。

第5章では、永久磁石形リニア同期モータの垂直方向磁気剛性を考慮した運動3自由度の制御系設計論として、電磁吸引形非接触支持の安定化運動制御の定式化とリニアモータの永久磁石が発生する支持、ピッチおよびロール方向の不安定磁気剛性の線形近似に基づくモデル化、それらの座標変換の理論を記述している。

第6章では、永久磁石形リニア同期モータの磁気支持安定化制御として、動作点周りの線形近似に基づく磁束、発生力のモデル化と、古典制御に基づく試験機の具体的磁気浮上安定化制御系設計を、理論と数値計算に基づき詳述している。特にリニア同期モータの永久磁石板の鉛直方向への変位が、磁気支持を不安定化する作用が強いため、磁気支持安定化制御器設計時にその影響を陽に考慮することが重要と述べている。

第7章は、これまでの、リニア同期モータ設計論の正しさ、モータ性能および磁気支持安定化制御の有効性を検証する試験機の概要と、実機測定結果に基づく性能検証結果を記録しその評価を論じている。

以上要するに、本研究は比較的大きな可動体を高推力で駆動し精密位置決めを目指す高性能電磁アクチュエータとして、非接触磁気支持された永久磁石横磁束形リニア同期モータの構造、サロゲートモデルを用いた実験計画法に基づく最適電機設計、ディテント力低減の数理と実用的手法、および運動制御法を提案し、数値解析と実験を通じそれらの有効性を実証したもので、電気工学、特に電磁アクチュエータを用いたメカトロニクスに貢献するところが少なくない。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。