

本論文は、「Semi-Zero-Power Maglev Control and its Coordination with Linear Motor for Flexible Conveyance System」と題し、小容量の搬送体を高頻度運転し、二次元リニアモータによる分岐や任意の曲線駆動を積極的に用いた搬送物流制御を可能とする柔軟な輸送システムを想定し、その重要な構成要素として4極3自由度電磁石を提案している。そして、省エネルギーかつ高品質な輸送のための浮上および駆動制御を包括的に検討すると共に、実験を通じてその基本的性能を実証したもので、全体で6章からなる。

第1章では、磁気浮上研究の背景をまとめ、本論文の位置付けを行っている。従来の電磁吸引浮上システムでは、吸引力発生源の電磁石としていわゆるU字形またはE字形電磁石が通常用いられてきた。これらの電磁石は1自由度しか制御できず、単独で浮上システムを構成できない。よって、複数磁石を平面状に配置してそれらを協調的に制御し浮上システムを構築してきた。本論文では、このU字型電磁石等に代わって、単独独立浮上が可能で二次元リニア駆動にも適した4極ヨーク結合型電磁石を提案し、その浮上と推進の協調制御を意図している。

第2章では、この4極ヨーク結合型ハイブリッド電磁石を説明している。まずは、4極電磁石の基本構造とその3自由度の制御方法を解析し、4極電磁石とリニアモータの組合せ方式の検討を行っている。4極電磁石には永久磁石が含まれているので、リニアモータの構成は、永久磁石リニア同期モータになり、比較的小さな電機子電流で大推力を得られる。また、一次元リニアモータを主として推進のために用いる一方、二次元リニアモータは分岐装置とする。その二次元リニアモータの駆動原理を定性的に記述している。そして、軽量化、小型化、単純化の浮上搬送システムを実現するため、提案する4極型電磁石のハードウェア最適設計を行っている。

第3章では、制御系を組むため、浮上系と推進系のプラントモデルをそれぞれ導出している。浮上系の厳密プラントモデルと線形化近似モデルの解析を行い、提案した4極の電磁石単独で3自由度の姿勢制御を行って安定浮上できることを明らかにしている。厳密モデルの解析結果によって、4極のばらつきが大きくない時、3自由度間の相互干渉は実用上問題ない程度に抑制できる。次に、電磁石・リニアモータ組合せ時の推進近似線形モデル、および組合せ時の浮上系制御パラメータ変動を調べている。最後に浮上系と推進系のパラメータの同定を実験で行っている。

第4章では、浮上制御系の設計と実験を行っている。まず、第3章で導出した浮上系の線形近似モデルに基づいて、古典制御理論——PID制御手法で3自由度の浮上制御系を設計した。次に、浮上系の性能を向上するため、状態フィードバック制御系による3自由度浮上システムを導入し、実験により安定浮上を実証している。ここで、外乱オブザーバを導入すれば本来の状態方程式にある状態変数に加え、外乱力も推定できる。さらに、この外乱力の中に、線形化に伴うプラントモデルの誤差も一緒に入ることによって、外乱力にもモデル化誤差にも強い制御系の設計が可能となることが示されている。磁気浮上システムの特長は非接触で支持することだが、この非接触時の給電は本質的問題となる。この問題を解決するためには、永久磁石を生かして浮上に必要な電力を低減するゼロパワー浮上が有力であるが、周期的外乱が入れば、浮上体が上下に振動し続けて、コイル電流をゼロに収束させることは結果的に難しい。そこで、このゼロパワー制御法とギャップ長制御法の中間的周波数特性が得られ、振動抑制と省エネルギーの両立が狙えるセミゼロパワー制御方式を提案し、その有効性をこの章で詳細に実証している。

第5章では、推進制御系の設計を扱っている。まず、1次元のリニアモータとの組合せ時の推進制御を中心に検討している。近似線形モデルの極を解析し、システムの機械的動特性に影響がない左半面に遠い極を無視することでプラントモデルの低次元化を図り、制御系設計を浮上系と同じ考え方で実施している。次に、二次元リニアモータと組み合わせた駆動を検討し、オープンループで任意軌跡を描ける駆動試験を成功させた。2次元駆動における位置情報のセンシングは難しい。そこで、2つの監視カメラでステレオ視することで、移動体の位置を検出することも視野に入れ、位置センシングの理論的考察を行っている。

第6章は、「まとめ」であり、本論文で得られた成果をまとめると共に、将来の展望について述べている。提案した4極電磁石3自由度浮上制御、およびその磁石とリニアモータの協調制御の設計法と、実システム構成上の問題点を要約している。

以上を要するに、本論文は、柔軟な輸送システムを構築するための技術要素として、単独で安定浮上可能な電磁吸引制御形浮上の4極3自由度電磁石を考案し、その電力消費の低減を目指したセミゼロパワー磁気浮上制御と、一次元・二次元のリニアモータと組み合わせた駆動を行う場合の固定子・可動子の設計、駆動制御法をまとめ、実験を通じ性能の実証を行ったもので、今後の電気工学の進展に寄与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。