
Semi-Zero-Power Maglev Control and its Coordination with Linear Motor for Flexible Conveyance System

(柔軟な輸送システムのためのセミゼロパワー磁気浮上

とリニアモータとの協調制御)

劉 江桁

磁気浮上技術は、物体を磁気力により非接触で支持することで従来の機械的支持機構における摩擦・摩耗、振動・騒音、潤滑油による使用環境の制限、メンテナンス、高速回転の限界などの諸問題を解決し、今後の産業界における新しい搬送システムを構築するための鍵となる技術として期待されている。

磁気浮上を実現する方式にはさまざまなものがあるが、電磁石と強磁性体間の吸引力を利用する吸引制御式(Electromagnetic suspension、EMS)は、小さな漏れ磁束、小型、超電導等の特殊な材料・装置が不要、静止浮上が可能等、さまざまな実用上の利点から磁気軸受、搬送システムの支持を中心として現在最も広く実用化されている。しかし、EMS システムでは、浮上系が本来不安定である事から複数の磁石についてフィードバック制御による安定化が必要となる。

そこで、本研究では、柔軟な磁気浮上搬送システムを構築するため、単独磁石で安定支持のできる新しいタイプの電磁石を提案し、その磁石の浮上制御および磁石とリニアモータとの協調制御を検討した。

本論文の内容および構成は、以下のようになっている。

第1章では、磁気浮上研究の背景をまとめ、本研究の位置付けを行った。従来のEMS システムにおいては、吸引力発生源の電磁石として、いわゆるU字型またはE字型電磁石が通常用いられてきた。これらの電磁石は単独では1自由度しか制御できず浮上システムを構成できない。よって、多数の電磁石を平面状に配置してそれらを協調的に制御する事で浮上システムを構築している。本研究では、従来用いられてきたU字型電磁石に代わって、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行う。

第2章では、4極ヨーク結合型ハイブリッド電磁石を提案した。提案した4極電磁石は以下の

- ◆ 単独で浮上システムを構築できる；
- ◆ ゼロパワー浮上を可能とする；
- ◆ 浮上姿勢を傾ける事によりアクティブに不平衡吸引力を発生できる

という3つの特徴を持っている。

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、その4極電磁石とリニアモータの組合せ方式の検討を行った。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進力を得られる。また、一次元のリニアモータを主として推進のために用いる一方、二次元の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た。

次に、軽量化、小型化、簡単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た。ここでは、電磁石製作の容易さを念頭に置きながら、構造が簡単、制御しやすい、電源容量が小さいなどの項目を指針に設計を行った。また、浮上系のロバスト性を損なわず、リニアモータ組合せ時の推力を大きくとれ、駆動時推力脈動の原因となる detent 力をできるだけ削減するという視点から磁石の断面積とポールピッチを選択した。

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た。まずは、EMS 浮上系は非線形かつ不安定なので、アクティブな制御による安定化が必要となる。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た。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ことが明らかになった。線形近似モデルに基づいて、その各自由度に対し、制御系をそれぞれ独立に設計できることも明示した。次に、電気機器の理論により、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た。リニアモータの電機子では、電機子の歯とスロットが存在するため、浮上体は一樣な鉄レールの下にあるときとリニアモータの下ある時では浮上のための磁気回路の特性が変わる。しかし、ここでは二次元の有限要素法を用いてこの磁気回路のモデルパラメータの変動が制御上重大な悪影響を及ぼすほどには大きくないことを確認した。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た。

第 4 章では、浮上制御系の設計と実験を行った。まず、第 3 章に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。PID 制御手法では、因果律のため純粋微分が実現できないため、擬似微分を行う。しかし、この擬似微分の時定数は純粋微分を前提として設計した制御系の中ではシステムの安定性に悪影響を及ぼすので、ここでは、真鍋の係数関法に基づいてシステムの安定性を解析した。

さらに、浮上系の性能を向上する目的として、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た。浮上系は巻線電圧を入力としたとき可制御なので、浮上制御系のフィードバック系の極は理論上任意に配置できる。しかし、本研究におけるセンサとしてはギャップセンサのみを考えているため、他の状態変数を推定するために状態オブザーバを導入した。オブザーバは LPF の機能を持っているので、センサノイズに強い。特に、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れてしまうことで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を計算で示した。さらに、その推定した外乱項を **feedforward** することで、浮上系の支持剛性やロバスト性が向上できることを実験的にも示すことができた。

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。その問題を解決するため、本研究で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を導入した。ゼロパワー浮上制御は、定常状態では永久磁石の吸引力のみで浮上体の重量を支持し、負荷変動時には磁石ギャップを自動的に調整して、定常時の電磁石コイルの制御電流をゼロに収束させる制御法である。しかし、外乱力があるとき、浮上体は積極的に浮上ギャップを変動させ、コイル電流をゼロに収束させようとするので、周期的外乱が入れば、浮上体が上下に振動し続けて、コイル電流もゼロに収束させることは結果的にできなくなる。その振動自身も搬送システムとしては望ましくないため、周期外乱時のギャップ変動はなるべく抑制する必

要がある。この観点から、本研究ではセミゼロパワー制御法を提案し、実験を行った。セミゼロパワー制御法はゼロパワー制御法とギャップ長制御法の中間的な周波数特性が得られ、振動抑制と省エネルギーの両立がねらえる制御方式である。同じ目的で、遅いゼロパワー制御法も実験し両者を比較検討した。この方法はゼロパワー制御系を設計するとき、制御系を浮上安定化とゼロパワーの2つの部分に分け、外側にある電圧（あるいは電流）の制御ループのみを遅くするようコントロールゲインを低く設定する制御法である。さらに第4章の最後に桁振動抑制の問題を簡単に記述した。

第5章では、推進制御系の設計を行った。ここでは、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た。リニア駆動の近似線形モデルは浮上系と似ているが、浮上系は本来不安定なので、原則的に制御系は速ければ速い程いいが、推進系は本来安定系である一方、位置の高速かつ精度良い検知は必ずしも容易でないので、速い制御系を設計することが必ずしも良いとはいえない要素を持つ。よって、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る。その上での制御系設計を浮上系と同じ考え方で行った。

また、2次元リアモータと組合せ時の駆動を検討し、位置・速度のセンシング技術を中心に検討を行った。2次元駆動するときには2次元の位置情報のセンシングは難しい。ここでは、ロボット工学でよく使っているロボットビジョンを導入し、二つの監視カメラで移動体の位置を検出することも視野に入れた。さらに、瞬時速度オブザーバを導入し、センサのサンプルレートが低くても検出の精度を落とさない方法も考察した。

第6章では、本論文のまとめとして、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た。本研究が磁気浮上技術とリニアドライブ技術の更なる発展と普及に貢献できることを期待する。