

別紙様式第13号（論文内容の要旨及び論文審査の結果の要旨）

氏名（本籍）	小林 義光（岐阜県）
学位の種類	博士（工学）
学位授与番号	甲第 456 号
学位授与日付	平成 26 年 9 月 30 日
専攻	生産開発システム工学専攻
学位論文題目	電流と磁束フィードバックによる磁気浮上搬送系の設計と構築に関する研究 (Design and construction of active electromagnetic levitation conveyance system with current and magnetic flux feedback)
学位論文審査委員	(主査) 教授 山田 宏尚 (副査) 教授 佐々木 実 教授 川崎 晴久 准教授 伊藤 聡

論文内容の要旨

本論文では、磁気浮上搬送系の実用性を向上させるため、アクチュエータである電磁石の電流と磁束をフィードバックすることで、浮上物体の3次元位置推定の実現し、その推定値を用いて浮上・搬送制御のロバスト性を向上させる制御手法の設計と構築について述べる。

一般に生産現場における産業ロボット等に用いられるロボットハンドの多くは、機械部品を直接把持する接触把持機構である。近年、製造機械の高性能化に伴って、多品種で高精度な機械部品の製造が求められている。そのため、搬送時の接触による物体の表面品質の低下やハンド形状によって把持可能な物体が制限されるなどの課題が挙げられる。そこで、機械部品を非接触で搬送することができれば、これらの課題が解消でき、一般的に接触搬送が困難な機械部品（例えば、塗装物や微小物体など）への対応が期待できる。このような背景から、非接触把持の代表的な技術である磁気浮上技術を応用して、非接触把持搬送の研究が多数行われている。

通常、磁気浮上システムは、不安定なシステムであることから、レーザ変位センサ等の外界センサを利用し、浮上物体の位置を検出することで安定浮上を実現しているが、センサの配置やコストの問題が生じ、搬送装置への応用が困難である。そこで、変位センサの配置に対しては、マニピュレータである電磁石の電流と磁束情報（電磁石の磁極部に配置したホール素子のホール電圧を計測）から浮上物体の位置を算出する方法が提案されており、搬送制御を実施した例も報告されているが、これらの研究では、浮上方向（鉛直方向）の1自由度のみの位置を推定している。一方で高速搬送時に発生する浮上物体の横揺れを抑制するためには、浮上方向（鉛直方向）と搬送方向（水平方向）の位置を検出する必要があることから、複数のホール素子配置による2次元位置推定（鉛直方向と水平1軸方向）が提案されている。これらは複数のホール電圧分布の関係式から位置を推定するものである。しかし、複数のホール電圧分布の関係式の導出が複雑であること、電磁石の動特性やノイズのフィルタ処理による推定値の位相遅れ等の問題が挙げられており、浮上物体の3次元位置推定の実現には至っておらず、推定位置を水平方向の制振制御に適用した事例などは報告されていない。

そこで、本研究では、これらの課題を解決して磁気浮上搬送系の実現性と利用性を向上させるため、3次元位置推定と非接触把持搬送のロバスト性を向上させるための手法を提案し、その設計と構築方法を示すことを目的とする。具体的には、単極電磁石を水平2軸スライダに取り付けた磁気浮上搬送

系を構成し、電磁石の磁極部に4個のホール素子を配置する。そして、電流とホール電圧（磁束）を計測することで、浮上物体の3次元位置を推定する方法を検討し、その推定位置を用いた鉛直方向の浮上制御と水平方向の制振制御を検討する。また、水平方向の搬送制御においては、浮上物体の振動励起を抑制する搬送軌道の生成と、浮上時や搬送中の外乱に対する振動抑制を考慮した2自由度積分型最適サーボ系の適用を提案し、追従性と制振性の両立できることを検証実験で評価する。さらに、ホール素子の磁束計測の問題と、その補償方法について検討する。

論文審査結果の要旨

本論文では、磁気浮上搬送系の実用性を向上させるため、アクチュエータである電磁石の電流と磁束をフィードバックすることで、浮上物体の3次元位置推定の実現し、その推定値を用いて浮上・搬送制御のロバスト性を向上させる制御手法を提案し、その有効性を示した。本論文において、得られた結果を要約すると以下の通りである。

1. 3次元位置推定と浮上制御と制振制御の確立

磁気浮上搬送系の3次元方向の運動モデルを導出し、また、浮上物体の3次元位置と電磁石の電流に対するホール電圧の変化を近似式で表現して、パラメータの同定手順を示した。また、ホール電圧の関係式に対するパラメータ変動や定式誤差、計測ノイズのフィルタ処理による位相遅れ、および磁気浮上搬送系のモデル化誤差が存在することを前提として、安定余裕に着目したオブザーバを用いた状態フィードバック制御系の設計を試みた。オブザーバに対する最適状態推定問題と状態フィードバックの最適レギュレータ問題の重み行列の選定によって、最適制御と同等の安定余裕が確保できることを示し、3次元位置推定と安定浮上が可能であることを数値シミュレーションと実験により検証した。

2. 振動励起の抑制を考慮した目標搬送速度入力生成

固有振動数周期の整数倍で加減速の時間間隔を設定して目標搬送軌道を生成すると、固有振動数成分の励起が抑制できることに着目し、磁気浮上搬送系の搬送制御へ適用した。数値シミュレーションと実験により、磁気浮上搬送において浮上物体の水平方向に対する振動励起が抑制できることを検証した。

3. 2自由度積分型最適サーボ系による搬送制御と制振制御の確立

磁気浮上搬送時において、浮上時や搬送中の外乱によって水平方向に対して浮上物体の振動が発生することを考慮して、搬送制御の追従性と、外乱に対する制振性を両立する手法として、2自由度積分型最適サーボ系の適用を試みた。数値シミュレーションと実験により、目標搬送軌道への追従性と外乱に対する振動抑制の効果が両立できることを実験で確認した。また、固有振動数の変化に対しても振動抑制ができること、また水平位置の推定誤差に対して目標位置への到達誤差が低減できることを示した。

4. ホール電圧変動に対する補償

ホール電圧の計測に対して、電磁石の抵抗値変動と同様にホール素子も温度上昇等によりホール電圧出力が変動すること、モータのエアリングノイズが大きく影響することを実験により示した。その補償として、ホール電圧変動を考慮してオフセット誤差を最小にするパラメータ同定方法を示した。また、電流と磁気吸引力の関係に時間変動がないことから、定電流制御を追加することで、鉛直方向の浮上制御が改善できること、ローパスフィルタにより、モータノイズが低減できることと安定余裕が劣化しないことを示した。

以上より、磁気浮上搬送系の位置計測の課題解決と浮上・搬送制御のロバスト性を示したことで、非接触支持型の搬送系への実用性と応用が拡大できるものと考えられる。また、今回の制御手法は、磁気浮上系だ

けでなく、制振性と追従性の両立を必要とする一般的な機械システム等への応用も可能であり、その社会的な貢献度は少なくない。よって本論文は博士（工学）の学術論文として価値のあるものと認める。

最終試験結果の要旨

学位論文を構成する学術論文として査読のあるジャーナルに2件、査読ある国際会議論文に1件、学位論文の基礎となる学術論文に関する判定基準「学術論文が査読付き学会誌や論文集（Proceedingsも含む。）に最低2編掲載されていること」を満たしており、博士後期課程学生としての必要な単位も修得し、平成26年7月18日に学位論文の内容を中心として、またこれに関した事項について諮問を行った結果、応答も的確であり、合格と認める。

発表論文（論文名、著者、掲載誌名、巻号、ページ）

小林義光, 亀山頌太, 佐々木実, “2 自由度積分型最適サーボ系を用いた磁気浮上搬送制御の実現”, 日本機械学会論文集(C編), 79 巻 804 号, pp.2673-2683 (2013.8).

小林義光, 高木健太, 佐々木実, 奥川雅之, “磁気浮上搬送のためのオブザーバによる 2 次元位置推定”, 日本機械学会論文集(C編), 76 巻 772 号, pp.3504-3511(2010.12).

Yoshimitsu Kobayashi, Yoko Terai and Minoru Sasaki, “Vibration Control of Active Electromagnetic Levitation System with Three-Dimensional Position Estimation by Current and Magnetic Flux”, 13th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS2013), No. TB01-4(2013.10).