

氏名	笠島 永吉		
授与した学位	博士		
専攻分野の名称	工学		
学位授与番号	博甲第5152号		
学位授与の日付	平成27年 3月25日		
学位授与の要件	自然科学研究科 産業創成工学専攻 (学位規則第5条第1項該当)		
学位論文の題目	電磁型球面モータの制御方法に関する研究		
論文審査委員	教授 五福 明夫	教授 渡邊 桂吾	教授 見浪 護

### 学位論文内容の要旨

本研究は、複数個の永久磁石を配置した球殻をロータとし、これを外側のステータに配置した複数個の電磁石により駆動する電磁型球面モータにおいて、ロータ姿勢を自在に制御する手法を提案するものである。従来の球面モータの研究では、回転可能な角度や取り得る回転軸に制限があるものが多く、全方向に回転可能としたものでも、永久磁石と電磁石の位置関係により駆動可能な方向に制限があり、原理的に誤差を含む。本研究では、各電磁石の発生するトルクを3次元のトルクベクトルとして扱い、これを合成することによって任意のトルクを発生することを可能とした。本手法は、理論的には誤差を含まず、また任意の永久磁石配置と電磁石配置の球面モータに適用可能である。また、トルク発生だけではなく、センサフィードバックによりロータの姿勢制御も可能とした。

本研究では、ロータの姿勢表現に基底の取り換え行列を用いている。これは $3 \times 3$ の行列であり、ベクトルの各座標系での表現を簡潔に変換可能である。また、本手法の特徴はトルクマップを用いることである。トルクマップの概念について、まず空芯のコイルを用いてロータを駆動する場合において、どのように所望のトルクを生成するか詳しく説明した。そして、発生トルクの理論値と実測値がよく一致することを確認し、さらに設定通りの軸周りに回転可能であることを実証した。

空芯では発生可能なトルクが極めて弱く、トルクを増大するためには鉄芯を入れた電磁石が必要である。しかしながら、鉄芯はロータの永久磁石により磁化されるため、コギングトルクが生じ、また発生するトルクの大きさや方向が電流値に対して非線形的に変化する。これらの問題を解消し、任意のトルクを発生する手法について説明した。コギングトルクを排し、回転方向トルクのみを生じる電流値を360度にわたり計算し、これを通電したところオープンループでロータが回転することを確認した。

次に、供給可能な電流に制限がある場合に、最大トルクを発生する電流値配分を求める方法を紹介する。3次元のトルクベクトルを生成する場合に、4組以上の電磁石が存在すると、その方程式の解としての電流値の組み合わせは無数となる。通常はミニマムノルム法などで一意的に決定されるが、これが最大トルクを発生できるとは限らない。この問題を線形計画法に変換できることを示し、シミュレーションによりミニマムノルム法と比較し、最大トルクと消費電力の違いを示した。

さらに、センサフィードバックによるロータの姿勢制御について説明している。まず、非接触の光学式マウスセンサーを用い、センサの情報処理方法とPID制御の方法について述べている。制御プログラムを開発し、ロータの位置決め制御が可能であることを確認した。しかしながら、マウスセンサーは、ロータの動きを検出し、これを積分してロータ姿勢を求めているため誤差が累積することが判明した。そのため、ロータ表面に複数のマークを添付し、その位置と傾きをカメラで検出することにより、ロータの絶対姿勢を求める手法を開発した。マークは常に見えらるとは限らず、また画像処理に時間がかかるため、マークが短時間に検出可能であった場合のみ累積誤差を解消するアルゴリズムで制御プログラムを作成し、実験によりその動作を確認した。

本研究で確立した駆動理論は、任意の永久磁石配置および電磁石配置の球面モータに適用可能である。これを確認するため、以上の実験で使ったものとはまったく異なる構造の球面モータを試作し、オープンループでの回転実験を行った。そして、設定通りの軸周りに回転可能であることを確認した。

## 論文審査結果の要旨

本研究は、複数個の永久磁石を配置した球殻をロータとし、これを外側のステータに配置した複数個の電磁石により駆動する電磁型球面モータにおいて、ロータ姿勢を自在に制御する新規な手法を開発している。この手法は電磁石を適切に励磁することにより任意のトルクの発生が可能であり、理論的には誤差を含まず、任意の永久磁石配置と電磁石配置の球面モータに適用可能である。また、トルク発生だけではなく、センサフィードバックによりロータの姿勢制御も可能としている。

本研究では、ロータの姿勢表現に、ベクトルの各座標系での表現を簡潔に変換可能な基底の取り換え行列を用いている。また、電磁石が単位電流で励磁された場合の回転トルクを電磁石位置に対してあらかじめ対応づけたトルクマップを用いて、回転制御を行っている。まず空芯のコイルによりロータを駆動する場合に、発生トルクの理論値と実測値がよく一致することを確認し、設定通りの軸周りに回転可能であることを実証した。空芯では発生可能なトルクが極めて弱いために、トルク増大のために鉄芯を入れた電磁石が用いられる。しかしながら、鉄芯はロータの永久磁石により磁化されるためコギングトルクが生じ、また発生するトルクの大きさや方向が電流値に対して非線形的に変化する。これらの問題を解消する手法を提案し、オープンループでロータが回転することを確認した。

また、供給可能な電流に制限がある場合に、最大トルクを発生する電流値配分を求める新規性のある方法を提案している。4組以上の電磁石により3次元のトルクベクトルを生成する場合には、電流値の組み合わせは無数ある。通常はミニマムノルム法などで一意的に決定されるが、最大トルクを発生できるとは限らない。本研究ではこの問題が線形計画法に変換できることを示し、シミュレーションによりミニマムノルム法と比較し、最大トルクと消費電力の違いを示している。

さらに、センサフィードバックによるロータの姿勢制御システムを構築している。まず、非接触の光学式マウスセンサーを用いた制御プログラムを開発し、ロータの位置決め制御が可能であることを確認している。マウスセンサーでは計測誤差が累積することから、ロータ表面に複数のマークを添付して、その位置と傾きをカメラで検出して、マークが短時間に検出可能であった場合のみ累積誤差を解消してロータの絶対姿勢を求める手法を開発し、実験によりその動作を確認している。

以上のように、本研究では電磁型の球面モータにおける新規性を有する回転制御手法を提案、実装して実験によりその有効性を検証していることから、学位授与に値すると判断される。