

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 木村 文陽

本論文は「静電モータを用いたハプティックデバイスに関する研究」と題し、静電モータを用いたハプティックデバイスの実現に必要な設計法や性能についての検討、また周辺装置技術に関する一連の開発研究で得られた成果を纏めたものである。

本文は以下に示す8章で構成されている。

第1章「序論」では、研究の背景と目的について述べている。まず、静電モータをハプティックデバイスに用いることで、単に従来の電磁モータと置き換えるだけでなく、その薄さや非磁性といった特徴を活かし、特にMR I環境における応用や薄型ディスプレイと一体化したデバイスへの応用が期待できることを述べている。次に、その実現に向けた課題として各制御方法におけるデバイスの構成や性能に関する検討のほかに、力センサや位置センサなどの周辺技術の必要性を挙げ、これらの課題の解決を本論文の目的とすることを述べている。

第2章「静電モータによるハプティックデバイスの構築法」では、装置構成、駆動方法、制御方法、性能に関する基礎的な検討と実験を行っている。まず、モデルを用いた解析では、静電モータがダイレクトドライブであることでその剛性を比較的容易に設定でき、また、移動子が軽量なためレンダリングの正確さにおいて優位であり、静電モータの特徴を活かした構築が可能であることを示している。次に、実験によってインピーダンス制御とアドミタンス制御のいずれも適用可能であることを示している。静電モータの駆動信号の分解能によってモータの推力特性が変化するため、波形の分割数を40以上にすることが望ましいことや、フレキシブルプリント基板の層構造について、フィルム表面に凹凸を設ける必要があることを示している。そして、ハプティックデバイスの実現には、高速な波形生成システムを含む小型駆動装置や、非磁性の力センサ、モータの構造的な特徴を損なわない位置センサの必要性を述べている。

第3章「FPGAを用いた駆動装置」では、高速な制御周期を実現するモータの駆動装置の開発について述べている。開発して装置は、FPGAを用いた小型の波形発生器と、汎用のパワーアンプIC、小型の昇圧トランスを用いた増幅器から構成される。一般に、ハプティックデバイスで十分な剛性を提示するためには制御周期が1kHz以上必要であると言われていたのに対し、本装置は最高で2MHzの制御周期で動作するため十分にその要求を満たすことを示している。一方で、本駆動装置を用いたモータの駆動実験では、印加信号周波数が大幅に高くなった影響によりモータの発熱現象が確認されたため、モータの静電容量とコンダクタンスを測定することで、発熱量を導出する手法について述べている。これによって、モータの適切な駆動周波数を選定し、発熱問題を回避することに成功している。

第4章「ファイバブラッググレーティング (FBG) を用いた力センサ」では、2個のFBGを用いた力センサについて、その原理や設計手法を明らかにし、試作した装置によって、その評価を行っている。反射光のスペクトル変化を検出する測定系が高価であり、また応答性に課題があったのに対し、考案したものでは、差動光回路によるフィルタ効果によって、特定の波長の光強度を安価な測定系で高速に検出できることを示している。また、ファイバの個体差を補償する手法についても明らかにしている。そして、これらの検討に基づいたセンサを試作しその性能を評価し、その有効性を確認している。

第5章「静電容量式エンコーダ」では、静電モータの推力制御に不可欠な電極位置を検出するためのセンサとして開発した静電誘導を用いた静電容量式エンコーダについて、その原理と設計手法などを述べている。このエンコーダは、移動子上に2相電極、固定子上に4相電極を有した構造になっており、静電誘導によって移動子へ電位分布を励起するため移動子は配線を持たないという特徴を有す。試作機による実験により、既存のハプティックシステムに大きな改造を加えることなく実装可能であることを検証している。

第6章「アドミタンスデバイスとしての構成」では、第2章から4章で得られた設計手法、駆動装置、力センサを用いて実際にアドミタンスデバイスを作製し、実験によってそれらの有効性を示している。また、作製したデバイスをMRI装置内に持ち込んで行った実験において良好な性能を確認し、MRI環境におけるハプティックデバイスへの適応の有効性を検証している。

第7章「インピーダンスデバイスとしての構成」では、第6章と同様にこれまでに得られた成果を用いて実際にインピーダンスデバイスを作製し推力制御を実現することでそれらの有効性を確認している。また、作製したデバイスを用いてディスプレイに表示した動画とインタラクションを行うことで、ディスプレイと一体化できるデバイスへの可能性を示している。

第8章「結論」では、本論文を総括するとともに、今後解決すべき技術課題を具体的に述べている。

このように、本論文の研究において、静電モータを用いることにより、強磁場であるMRI環境で使用できるハプティックデバイスを実現し、その構成法を明らかにしている。加えて、FBGを利用して、制御のために必要な力センサーを開発するとともに、変位センサーとして移動体に給電を不要とした静電エンコーダを新たに開発している。これらの成果は、精密機械工学、メカトロニクス、静電気工学、ロボット工学等の学問分野の発展に貢献するものであり、工業的利用への期待も大きいと言える。

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。