

論文の内容の要旨

論文題目 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

氏 名 木 村 文 陽

本文

近年、様々なハプティックデバイスが開発され、その応用分野は拡大の一途をたどっている。それら応用分野の中で、人間の運動制御学に関する研究は、ハプティックデバイスが大きく貢献すると期待される分野の一つである。なぜなら、ハプティックデバイスは様々な力覚を被験者に提示する必要がある多くの運動制御学に関する実験に適用することが可能だからである。特に、それらハプティックデバイスを用いた実験の中でも、機能的核磁気共鳴装置(functional Magnetic Resonance Imaging : fMRI)を用いた実験は人間の運動制御学に大きな貢献をもたらすとされている。しかしながら、fMRIを用いた実験を実現するには、一般にMR対応性と呼ばれ、強磁場環境下への対応と言う大きな困難が立ちほだかっている。一般的に、MRI装置はその測定を行う為に1Tを超える強磁場を用いる。そのような強磁場は、汎用的に広く用いられている電磁モータの動作に干渉しその動作を著しく不安定にしてしまう弱点がある。更に、一般に"ミサイルエフェクト"と呼ばれ、磁性体が強磁場に引かれてミサイルの如く早いスピードで装置に向かって飛んでいく現象に対して、その安全性を確保するため、MRI装置と共に用いる周辺機器には、磁性体を含む一般的なモータ等を持ち込んではいけないと言うルールが敷かれている。

その様な問題を克服する為に、これまでにさまざまな非磁性のハプティックデバイスが研究されてきた。これまでの研究では、離れた位置にある電磁モータの出力を非磁性材料を用いた伝達機構によって伝達する方式や、非磁性な圧電素子を用いた超音波モータを組み込んだデバイス等が考案されてきた。しかしながら、多くの非磁性機構はその特性に非線形性を有しており、その特性が制御を困難なものにしていることが懸念される。

一方で、静電アクチュエータを用いたハプティックデバイスも提案されている。数ある静電アクチュエータの中でも、交流駆動両電極型静電モータは、3相帯状電極を配線した2枚のフレキシブルプリント基板フィルムで構成され、既存の電磁モータに迫る出力性能と制御性能を実現している。よって、この静電モータをハプティックデバイスに用いることで、前述の課題を解決することが期待されている。更に、薄型化や小型化が容易なことから、MR対応のアプリケーション以外にも、近年その数を急速に増やしている携帯型端末に組み込みが可能なハプティックデバイス等への応用も期待出来る。しかしながら、これまでの研究では、デバイスの設計に主眼が置かれており、周辺技術も含めたシステム全体に踏み

込んで研究されている例はほとんどない。

例えば、静電モータは、その駆動に数 kV の三相交流信号を必要とすることから、実際の駆動には研究開発用途で用いられる大型のアンプが使用されてきた。しかし、その様な大型のアンプを使用することはハプティックデバイスの携行性を著しく損なってしまう為、それらの要求に見合った専用の駆動装置開発が必要とされている。また、もう一つの例としてハプティックレンダリングがあげられる。先行研究においては、シンプルで排他的なレンダリングプログラムを専用に開発してきた。しかし、静電モータを用いたハプティックデバイスをより広範囲で利用するためには、デバイスは汎用的なハプティックツールに実装されなければならない。また、ハプティックデバイスの制御手法には、インピーダンス型とアドミッタンス型と呼ばれる 2 種類の方法があるが、静電モータの性能はモータの積層を行うことで大きく変わることが報告されている為、積層方法によって制御手法を変える必要のあることが予測される。しかし、これまでの研究では断片的に触れられるのみであり、制御手法について体系的に議論されていない。

この様な状況を踏まえ、本研究では、静電モータをハプティックデバイス用アクチュエータとして用いた場合の、ハプティックデバイスとしての性能を明らかにして静電モータを用いたハプティックデバイスの設計枠組みの構築を目指し、駆動装置や、制御に必要な各種センサについて、静電モータを活かしたアプリケーションに対応出来ることを目的とした周辺技術の開発を行うことを目的とする。

本論文は 6 章から構成される本論に、序章と結論を合わせた全 10 章から構成される。

以下、各章の概略を述べる。

第 1 章では、本研究の背景として、ハプティックデバイスの歴史、静電モータの概要を述べ、本研究の目的と概要を示す。

第 2 章では、ハプティックデバイスと静電モータの基礎的な事柄を議論し、設計枠組みの構築を行う。ハプティックデバイスは、その制御手法から大きく分けてアドミッタンス型とインピーダンス型に分けられるが、静電モータの場合は、モータの構造や積層方法によってその適応は別れる。両方式を用いた場合のデバイス構成について議論し、続いてデバイスの設計に必要なパラメータから、制御モデルを構築し制御工学的観点から予測される性能を検討する。議論に基づいた簡単なプロトタイプを実際に製作し、実験的に性能評価も行う。

続いて、第 3 章から第 5 章までは、第 2 章で議論された内容に基づき、必要な周辺技術開発を行う。

第 3 章では、駆動装置の開発について述べる。静電モータの駆動には 1kV 以上の高電圧と、数百から数 kHz までの周波数帯域が要求される。これらの信号を、モータの駆動方法によっては 6ch(3 相交流を 2 組)分同期して発信する回路が必要となる。また、ハプティックデバイス用の駆動装置としては、1kHz 程度の応答速度が必要とされることから、この程度の速度でモータの駆動に必要な信号は高速生成される必要がある。更に、携帯性を実現する為に小さな駆動装置であることも必須である。小さな昇圧装置としてはトランスが安価かつ簡便であることから、小型トランスを用いるのに適した方法として、モータの駆動は 2 周波数法で行うこととする。以上の要求を満たす駆動装置について議論し、実際に作成して性能評価を行う。

第 4 章では、力センサの開発について述べる。アドミッタンス型のハプティックデバイスを実現するには力センサが必須であることが第 1 章で述べられている。また、この力センサも当然のことながら MR 対応であることが求められる。従来研究では、光学式の変位センサが力センサとして用いられてきたが、その剛性や信号のドリフトだけでなく、ねじれや温度補償について懸念されてきた。そこで、本章では光ファイバ FBG と言う、コア部分に周期的な屈折率変化を持つ光ファイバを利用した力センサを提案する。2 本のファイバを差動的に用いることで、従来提案されてきた FBG ファイバを用いたセンサよりも剛性を高く保ち、更に温度やねじれ補償が可能な手法について議論し、実際にハプティックデバイスに組み込みが可能な力センサの開発を行う。

第 5 章では、位置センサについて述べる。ハプティックデバイスをインピーダンス制御によって駆動する場合、位置センサが必須であることが第 1 章で述べられている。また、静電モータは同期モータなのでオープンループによる位置決め制御が容易な一方で、推力制御は変位センサとの緊密な連携制御が必須であることから、その意味でも位置センサは必須である。そこで、本章では、静電モータに組み込み可能であり、かつモータへの負担を軽減する意味で移動子側への配線を不要とする静電容量式位置センサを提案する。まず、原理を数式によって確立し、続いて性能を最大限引き出すことの出来る最適な設計手法について解析を行う。そして最後に、試作機を用いた実験的評価を行う。

第 6 章と第 7 章では、第 3 章から第 5 章までに開発された周辺技術を用いて実際にハプティックシステムを構築し、実装評価を行う。

第 6 章では、アドミッタンス型ハプティックデバイスの開発について述べる。第 2 章で得

られた議論に基づき、第 3 章で開発した駆動装置と第 4 章で開発した力センサを用いてアドミタンス型ハプティックデバイスを構築する。本研究のモチベーションの一つとして、第 1 章で述べた fMRI 装置を用いた実験に適用可能なハプティックデバイスの実現は本章によって為されることになるため、構築されたデバイスを実際に fMRI 装置内に持ち込み評価実験を行う。評価実験では、デバイスが装置から干渉を受けずに安定して動作するか、また逆にデバイスが装置の撮像結果に干渉していないかを評価し、研究のモチベーションが達成されていることを示す。

第 7 章では、インピーダンス型ハプティックデバイスの開発について述べる。第 2 章で得られた議論に基づき、第 3 章で開発した駆動装置と第 5 章で開発した位置センサを用いてインピーダンス型ハプティックデバイスを構築する。第 6 章とは異なり、インピーダンス型デバイスとしてもシステムが構築可能であることを示し、特に本研究のもう一つの目的である薄型ハプティックデバイスの実現について、デバイスの評価実験を通してその目的が達成されている事を示す。

最後に、第 8 章では本論文の結論を述べる。本研究で得られた成果についての総括を行い、更に今後の展望について述べる。