

## 審査の結果の要旨

氏名 西嶋 隆

本論文は「軽量・柔軟な機械要素を実現する静電モータシステムの開発」と題し、交流駆動両電極形静電モータの物理的柔軟性に着目した、柔軟なアクチュエータとしての推力特性評価、柔軟なアクチュエータのためのセンサ技術、及びこれを用いた応用研究に取り組んだ研究成果を纏めたものである。

本論文は、全7章から構成されている。

第1章「序論」では、本研究の背景と目的、本研究の対象である交流駆動両電極形静電モータの概要、及び本論文の構成について述べている。近年の柔軟なアクチュエータ・センサへの要求、現状のソフトアクチュエータについて俯瞰し、本論文の研究対象である交流駆動両電極形静電モータが柔軟で耐屈曲性に優れたフレキシブルプリント基板で構成されていることから、柔軟なアクチュエータとなり得ることを述べている。本論文の主な目的として、1. 交流駆動両電極形静電モータの屈曲時の推力特性の把握、2. 柔軟な静電モータのためのセンサ技術開発、3. 高出力両面駆動積層形静電モータの開発の3点とし、これらの成果を踏まえた応用研究として、ロボットアームの開発、ハプティックグローブの開発を行い、その有用性について議論することを述べている。

第2章「柔軟な構造を有する静電モータ」では、交流駆動両電極形静電モータの屈曲した状態における推力特性について解明している。理論解析では一对の移動子と固定子で構成される交流駆動両電極形静電モータについて、モータの容量係数行列による等価回路モデルを用い、モータ屈曲時の推力特性を求めている。解析の検証実験では、理論解析と同様な傾向の推力特性が得られており、交流駆動両電極形静電モータは屈曲しても駆動可能な柔軟なモータとして機能することを明らかにしている。さらに、複数の移動子・固定子を積層して高推力化を図った積層形静電モータについても、屈曲時の推力特性について解析し、適切な積層構造についての知見を得ている。

第3章「交流駆動両電極形静電モータのセンサ技術」では、移動子位置及びモータの屈曲を検出するための、モータ組込み型のセンサ技術について述べている。交流駆動両電極形静電モータ用の電極位置センサ技術を応用して、屈曲したモータの移動子位置検出、及びモータの屈曲検出を試みている。センサの等価回路モデルより、位置センサと屈曲センサの直線性について解析し、検証実験を行っている。これらの結果を踏まえて、移動子位置と屈曲の両方を同時に検出可能なセンサ電極構造を考案し、交流駆動両電極形静電モータに組み込むことが可能なセンサ技術を開発している。さらに、駆動電極を電極位置センサ用の電極として併用する、電源重畳方式のセンサについて、そのセンサ等価回路の解析によりセンサ原理を解明し、センサ出力の直線性向上のためのセンサ回路設計の指針を得ている。

第4章「高出力両面駆動積層形静電モータ」では、積層形静電モータの更なる高出力化

を実現する両面駆動積層形静電モータを開発している。従来の移動子・固定子フィルムは駆動に寄与する面が片面であったが、本章で開発した新型の両面駆動型の電極フィルムにより、表裏面の両接触面において推力を生成可能となり、積層時に従来の約 2 倍の駆動面積を得ることを可能としている。さらに、電極ピッチの微細化により従来の約 1.4 倍の単位面積あたりの推力が得られることを確認している。新型の電極フィルムを 10 組積層した積層形静電モータを試作し、モータの出力/重量比、効率を測定し、効率を低減させている各種の損失について考察し、約 70%がフィルム摩擦等の機械的損失であることを実験により求めている。本章で開発した高出力両面駆動積層形静電モータは第 7 章のハプティックグローブにて応用されている。

第 5 章「ロボットアーム」では、開発した静電モータの応用研究として 2 自由度ロボットアームの開発を行い、軽量・柔軟な静電モータの特徴を発揮する、モータの設置方法や構成方法について論じている。従来の高剛性なモータでは配置することができないような、ロボットアーム内の狭隘部に、薄型・柔軟な静電モータを屈曲した形状で配置することが可能である一例と、軽量でダイレクトドライブである特徴を踏まえた、生物の拮抗筋を模倣したモータ構成方法について述べている。これらを採用した軽量なロボットアーム用いて、関節角度を制御するシステムを試作し、ダイレクトティーチングプレイバックによる Pick-and-Place タスクを実行し、良好に制御可能であることを確認しており、軽量・柔軟な静電モータの有用性が示されている。

第 6 章「ハプティックグローブ」では、軽量・柔軟な静電モータを応用した、指に装着するタイプの力覚提示デバイスを開発している。従来の多くのハプティックグローブは、ワイヤ牽引、リンク機構などの複雑な構造で構成されているが、本静電モータを屈曲する指に沿わせて配置する設計により、軽量かつ簡便な構造とすることが可能となることを示している。本章では第 4 章で開発した両面駆動積層形静電モータ、第 3 章で開発した屈曲センサが用いられている。制御実験では、アドミッタンス型の力覚提示手法を用いて、異なる 3 種類のバネ定数からなる仮想反力を提示することが可能であることを確認しており、軽量・柔軟な本静電モータが柔軟に屈曲しても優れた制御性を有することが示されている。第 7 章[結論]では、本研究で得られた成果についての総括を行い、さらに今度の展望について述べている。

このように、本論文でなされた研究は、交流駆動両電極形静電モータが軽量・柔軟なアクチュエータとして機能することを示すとともに、柔軟な静電モータのためのセンサの技術を開発し、さらには、本論文で提案、開発した技術を用いた応用研究によりその有効性を示すことで、交流駆動両電極形静電モータの柔軟なアクチュエータとしての新たな可能性を示したものである。その成果は、次世代のメカトロニクス・ロボティクス分野における要素技術の発展に大きく貢献するものといえる。

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。