

## 審査の結果の要旨

論文提出者氏名 三木 則尚

本論文は「交流磁場による微小浮上機構の駆動と姿勢拘束」と題し4章からなる。本論文の目的は、磁場中における微小機構のダイナミクスを明らかにすることである。研究対象としたのは、交流磁場中で回転する磁性体回転翼をもつ微小浮上機構である。MEMS技術により試作した微小機構の磁場中での浮上について、微小機構の3次元運動を理論的に解析し、実験により検証している。特に、微小機構の3次元運動の実験は前例がなく、本論文の独創的かつ意義を有する点である。

第1章「序論」では、微小機構の姿勢制御に関する研究の必要性が述べられている。また磁場によるエネルギー供給、回転翼による推力生成、磁気異方性トルクによる姿勢制御の有効性が述べられている。交流磁場によって駆動される磁性体回転翼をもつ微小浮上機構では、交流磁場による回転駆動とある方向への拘束がともに同時にできることを示し、有効性を主張している。

第2章「交流磁場中で回転する磁性体回転翼」では、一方向交流磁場中で回転する磁性体回転翼の駆動原理が述べられている。磁場が一方向であることは、微小機構の姿勢拘束への応用、システムの簡素化という利点をもつ。回転翼に発生するトルクを導きだし、シミュレーションをおこなっている。対象となる磁性体は、MEMS技術による製作が容易な軟磁性体としているので、回転中に磁化の大きさ、方向が変化する。シミュレーションの結果は以下のようなものである。交流磁場と同じ周波数の初期回転を与えると、磁場に同期して軟磁性体翼が回転し、回転翼はほぼ等角速度運動をする。回転周波数が大きくなると、空気抵抗によるトルクの増加により回転の位相が交流磁場の位相に遅れる。次に磁性体翼と回転軸をもち、ガラス管をガイドとして回転する磁性体回転翼を試作し実験をおこなっている。磁性体回転翼はその翼形状から、ダウンフローにより容易に初期回転が与えられ、交流磁場中で磁場に同期し回転する。回転翼が生成する推力が自重を上回ると、回転翼は浮上する。回転翼の翼特性を表わす無次元数  $C_{rw}$  を定義し、浮上周波数における回転翼の翼特性を評価した。実験結果から振動の影響を考慮し  $C_{rw} = 1$  とみなすのが妥当なことがわかった。翼長 2.5 mm の回転翼は、回転周波数 600 Hz において 75  $\mu\text{N}$  の推力を発生するため、重量 3.5 mg の微小機構のアクチュエータとして十分な性能をもつ。

第3章「回転翼をもつ微小機構」では、第2章の磁性体回転翼をもつ微小機構の磁場中の運動が述べられている。微小機構は、磁性体回転翼、回転軸を支えるアーチ、ボディ、推力を伝達するディスクからなる。回転翼とディスクは回転軸に接着されている。ボディ上に磁性体薄膜が成膜されており、微小機構は磁気異方性をもつ。磁化容易軸を  $x$  軸、 $x$  軸に垂直で水平方向を  $y$  軸、鉛直方向を  $z$  軸とする。交流磁場が  $x$  軸方向のときに姿勢が安定である。外乱により微小機構が  $y$ 、 $z$  軸まわりに回転すると、磁場方向、すなわち磁化方

向と磁化容易軸がずれ、磁気異方性トルクが復元力として発生する。よって交流磁場は  $y$ ,  $z$  軸まわりに微小機構の姿勢を拘束する。  $x$ ,  $y$ ,  $z$  軸まわりの微小機構の姿勢に関する理論的な解析がなされている。  $x$  軸周りの姿勢は磁気により姿勢制御できない。回転軸が鉛直方向からずれると、微小機構は水平方向の運動をおこなう。軸を鉛直方向に保持するため、微小機構はアーチをもつ。さらにガイドとしてワイヤを 2 本微小機構上に設置した。これにより微小機構が、回転翼の回転周波数 540 Hz においてガイドまで浮上している。  $y$  軸まわりには伝達機構の製作誤差によるトルクが発生し、微小機構は回転周波数と同期した振動と、磁気異方性トルクを復元力とする単振動をおこなう。  $z$  軸まわりには推力を伝達するディスクとボディ間に摩擦によるトルクが発生し、微小機構はこのトルクによるオフセットをもち磁気異方性トルクを復元力とする単振動をおこなう。試作した微小浮上機構を用いた実験による微小機構の運動は理論解析の結果と一致し、磁気異方性トルクによる  $y$ ,  $z$  軸まわりの姿勢拘束が実現されている。実験の結果から磁気異方性を表わす反磁界係数を計算している。またディスクとボディ間の摩擦係数を 2.9 と算出している。

第 4 章「結論」では本論文の結論が以下のように述べられている。交流磁場中で回転する磁性体回転翼をもつ微小浮上機構のダイナミクスを明らかにした結果、磁気異方性トルクによる姿勢拘束が有効であると主張している。磁性体翼として、迎角が 0.6 rad 以上の軟磁性体平板翼が使えることが実験的に確かめられた。MEMS との相性もよく、微小攪拌機構、微小ポンプなどへの応用が期待される。実験によって、磁気異方性、摩擦係数などの物理的パラメータが得られた。交流磁場により、駆動と拘束を同時におこない、システムの簡素化、軽量化ができるため、浮上機構に限らず様々な MEMS において有効であると主張している。

以上要するに、本論文において、磁性体回転翼、微小浮上機構による解析と実験はともに独創的なものであると認められる。特に、微小機構に働く流体力や磁気異方性による力およびそれらによるダイナミクスや安定性を実験的に評価した点の意義は大きい。また、磁場によって駆動されるマイクロフイディクデバイスのロータなど、流体力をうける流体アクチュエータに展開可能な基礎研究としての意義もある。この際、一方向交流磁場によって、ある方向に拘束力を与えることと回転駆動が同時に可能である点は、システムを簡素化する上で有効な方法であると認められる。

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。