

審査の結果の要旨

氏名 宇佐美 尚人

本論文は、「自律可動型マイクロエージェントの実現に向けた電力伝送及び静電駆動手法に関する研究」と題し、微小電気機械（Microelectromechanical Systems、MEMS）技術を応用して大きさ数ミリメートル立方の三次元筐体の中に、電気エネルギーを受け、自律的に判断し、自走し、相互に情報通信を行う機能を有する「自律分散マイクロエージェント」の実現に必須な「自走機能」並びに「エネルギーの受電機能」に注目し、理論を構築し、実験結果に基づいて論じたものである。日本語で執筆され全5章および付録からなる。

第1章は「背景」であり、構成するエージェントが目的及び環境を各々認識して自身の行動を自律的に決定し、要素間が協調して動作することによって、システム全体を統合する管理機構無しに大域的秩序を発現する「自律分散システム」の、自走式ロボット分野における応用研究動向を調査している。特にMEMS素子と大規模集積回路（Very Large System Integration、VLSI）とが融合した「集積化MEMS」によって、「数ミリメートル立方の自律エージェント（Catom）」を実現し、Catom同士の結合・離脱・移動によって全体形状が自由に変形する機能を実現しようとする「Programmable Matter」と呼ばれる研究に注目し、エージェント実現のための技術課題として、駆動（アクチュエーション）ならびに電力伝送手法の高度化が必要であると論じている。

第2章は「静電引力による3次元Programmable Matter向け回転アクチュエータ」であり、自走のためのアクチュエーション技術として、MEMSとして利用可能な候補技術の中からスケーリング則を軸に比較検討し、静電引力の利用が最適であると論じている。静電引力による駆動実験を1ミリ及び2ミリメートル立方の球形状物体（Catomモデル）、並びにフレキシブル基板を巻紙的に加工することで作製された直径5ミリメートルの円筒状物体を用いて行い、動作を数式及び数値シミュレーションによって解析し、過去の研究も含め転がり駆動が出来ない場合の原因を、局所的な曲率半径によるトルク超過であると同定し、併せて静電駆動により動作可能な質量の上限について議論している。

第3章は「自律分散マイクロロボット向け大規模無線給電システムの構築」であり、集合した多数のエージェントに対して無線に電力供給を行うための最適設計論を論じている。電力伝送の仕組みとしてはインダクタを結合し、直列共振回路を用いたいわゆる磁界共鳴方式を採用し、複数素子受電のための給電方式を論じている。検討の結果、送信側は **Catom** 全てに結合するため大型の、受信側は **Catom** 素子の寸法で制限される限り最大のインダクタを利用することが最適であり、インダクタ同士の結合係数が低い制限を補うためには直列抵抗成分が低くかつインダクタンスが大きい、所謂 **Q** の高いインダクタが必要であること、**Q** 値は周波数に依存して最大値を持ち、それが系全体の駆動に適した周波数(例えば **13.56 MHz**)で最大となるような設計が最適であることを導き、それを実現するには基板の深さ方向に線幅を増やした、所謂高アスペクト比構造を持ったインダクタの開発が必要であることを論じている。

第4章は「超臨界流体成膜を活用した埋め込みインダクタの作製の検討」であり、第3章で導いた設計論に基づき、高アスペクト比インダクタ作製のための基幹技術ならびに課題を実験的に検証している。シリコン (**Si**) 基板深さ方向に深掘りエッチング加工によって溝を掘り、絶縁層、原子移動抑制のためのバリア層を形成した上に、配線層金属材料によって埋め戻すプロセスを提案し、特に種層の積層について、表面張力が無いため埋め込み性能に優れている超臨界流体を用いた成膜 (**SuperCritical Fluid Deposition, SCFD**) 手法の活用を検討し、実験によって特に密着性の問題が解決されるべき課題であると同定した。その際、原子間力顕微鏡 (**AFM**) 等の形状観測ではほとんど区別のつかない膜質の差異を、電氣的に定量評価することができるテスト構造を考案実証した。

第5章は「むすび」であり、本論文で示した研究成果を総括するとともに将来の展望を議論している。

以上これを要するに本論文は小型自律可動型マイクロエージェントを考察、必要なシステム機能から個々のデバイス性能要求をトップダウン的に導出し、実験を通じてデバイス実現可能性のボトムアップ検証を行った研究であって、特に自走式マイクロエージェントの自律駆動に適した無線エネルギー伝送用小型インダクタの性能向上要件を導き、作製プロセスの課題を実験的に検証したものであり、電気電子工学の発展に貢献するところが少なくない。

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。