

## 審査の結果の要旨

論文提出者 尾川 順子

本論文は、「微生物の電気走性のモデルとその応用に関する研究」と題し、6章より構成されている。ゾウリムシを例に微生物の電気走性について、基礎的な実験、制御システムの設計、制御モデルの構築、制御実験、軌道計画手法の導出、工学的な応用可能性の提案等について、研究を行った成果が示されている。

第1章は「序論」であり、従来のマイクロマシンシステムの課題を指摘したうえで、優れたマイクロロボットとしての微生物に着目し、微生物の機能の工学的理解と工学応用の意義を述べている。さらに、工学応用のキーテクノロジーとしてのアクチュエーションを取り上げてその基礎概念を提示し、電気走性によるアクチュエーション手法を提案するとともに、その対象生物としてゾウリムシを選定した理由を述べている。

第2章では、「微生物の電気走性とその応用に向けた予備実験」と題し、アクチュエーション手段としての電気走性に着目し、その利用のための基本的特性について基礎的な実験を行い、電気走性の有効性を実験的に示すとともに電気走性制御システムの構築に向けた設計指針を与えている。同時に、電気刺激入力デバイスとそれを用いたゾウリムシの応答計測システムを構築し、実際に電場ステップ刺激に対するゾウリムシの応答の実験結果を示している。その結果、ゾウリムシの応答には個体差や個体内ゆらぎが大きいことが示され、これらを考慮したシステム構築のための設計指針が議論されている。

第3章では、「高速トラッキングを利用した電気走性制御システム」と題し、運動するゾウリムシを高精度で継続して計測・制御するために高速トラッキングを利用した電気走性制御システムを構築している。高速トラッキングは高速画像処理システムとXYステージによって実現され、フレームレート 1kHz という高い時間分解能で、遊泳する微生物を常に視野中心に保持することを可能にしている。また、高速画像処理システムによって取得された特徴量から3次元姿勢推定や対象のセグメンテーションが行えるほか、特徴量を電気刺激入力デバイスにフィードバックすることにより、微生物にリアルタイムで刺激を与えることが可能となっている。このシステムを用いたゾウリムシの制御実験結果として、開ループ制御によるジグザグ運動、閉ループ制御による 1mm 幅微小領域内トラップが示されている。

第4章では、「電気走性のダイナミクスモデルの構築と検証」と題し、ゾウリムシの電気走性のダイナミクスモデルを構築し、実データをもとに検証を行っている。電気走性の本質である Ludloff 現象に対して、ゾウリムシの繊毛打方向の違いによって生じる回転トルクを算出し、運動方程式を導出している。構築したモデルから、細胞が電場に対して垂直になる時にトルクが最大となること、細胞が電場方向に向く運動は力学的に安定であること、電場と反対の向きに置かれると、Uターンして電場方向に泳ぐこと等の特徴が導き出され、電気走性の実験的結果と定性的に矛盾がないことが示されている。

第5章では、「ダイナミクスモデルの微生物制御への応用」と題し、第4章で構築したモデルをもとに微生物制御の更なる可能性について述べている。まず、トラップ実験におけるオーバラン現象をモデルによって解析し、ゾウリムシの軌跡はゾウリムシ自身の繊毛

の出す力の個体差に依存しないことを明らかにしている。この結果を利用してトラップ実験を行った結果、はみ出し量が軽減され、制御性能が向上することが示されている。また、ゾウリムシが2輪車系によく似た非ホロノミック拘束系とみなせることを示し、ゾウリムシが後退できないという点を考慮した軌道計画手法を提案し、目標地点に向かって安定に軌道が収束することを示している。

第6章は「結論」であり、本論文のまとめが述べられている。

以上要するに、本論文は、微生物の電気走性のモデルを提案し、工学的な応用可能性を探ることを目的として、微生物を制御するシステムを構築することにより実際に微生物アクチュエーションを実現するとともに、電気走性モデルの解析により微生物アクチュエーションの可能性を示している。これにより微生物の電気走性に関する新たな知見を得るとともに、微生物アクチュエーションの可能性を開拓しており、今後この分野の展開に対して重要な指針が示されている。

これらのことから、微生物運動制御という新しい研究分野を開拓し、システム情報学の発展に寄与すること大であると認められる。

よって本論文は博士（情報理工学）の学位請求論文として合格と認められる。