

審査の結果の要旨

氏名 土屋 健介

本論文は「操縦形マイクロハンドリングシステムの構築」と題して、6章で構成される。微細な物体を対象とする場合、従来は、大量の対象物を一つの集団としてとらえ、それに対して操作を加えて大量の結果を得る、という手法が用いられてきた。しかし、近年は、特定の1個を対象として機械的な操作を加えるマイクロハンドリングが、工学・医療・生命の各分野で必要とされている。この要求を満たすシステムはこれまでも開発されてきたが、それらは、マニピュレータ・アクチュエータなどに既存のものを寄せ集めて、機能ではなく手法が主導する形でシステムが設計されているため、十分に要求機能が満たされていないという問題があった。また、個々のシステムが多種多様で、そこに用いられている技術やノウハウが知識として統合されていないため、新しいシステムを設計するとき、過去の知識が活かされないという問題もあった。本論文は、1mm以下の任意の微細物を対象として、対象物の状態検知・判断・操作の決定・実行というすべての過程を、人間の判断に基づいて行うハンドリングを"操縦形マイクロハンドリング"と定義し、それを実現するシステムの構築を目的として行われたものである。そのための方法として、まず、操縦形マイクロハンドリングシステムの設計指針を提案する。次に設計指針に基づいて、マイクロハンドリングが汎用に行える操縦形マイクロハンドリングシステムのプロトタイプを開発する。さらに、各種の要求に対して、個々に対応するシステムを開発し、実際の試作・試用を通して、設計指針を帰納的に評価している。

第1章は「序論」であるが、「研究の背景」、「研究の目的」、「本論文の内容と構成」についてそれぞれ述べている。「研究の背景」では、操縦形マイクロハンドリングの定義と、微細物を対象とする従来研究の現状を整理して、その中で本研究の位置付けを順に述べて、従来研究の問題点から本研究の目的を導いている。

第2章は、「操縦形マイクロハンドリングシステムの設計指針を提案」である。人間が1mm以下の任意の微細物に対し観察しながら機械的な操作をするという要求機能とそのときの制約条件を分析し、その中で操作を実行するために必要な機構要素群やその機能や構成を整理し、従来の操縦形マイクロハンドリングシステムを分析することで検証し、設計指針として提案する。具体的には、微細なものは人間が直接見たり触ったりできないこと、システム自体は微細にならないこと、通常の世界とは異なった物理現象がおこること、という3つの制約条件から、システムを構成する顕微鏡・マニピュレータ・工具・パレットの4つの機構要素群、対象物と同程度に微細な先端を持つ先細単針吸着工具、機構要素の集中配置構成、の3項目を設計指針として導いている。

第3章は「設計指針に基づく操縦形マイクロハンドリングシステム`ナノ・マニファクチャリング・ワールド'の開発」であるが、提案した設計指針に基づいて、操縦形マイクロ

ハンドリングシステムの一つの具体例としてナノ・マニファクチャリング・ワールドと呼ぶテーブルトップファクトリを開発している。要求される作業から必要な機能を分析し、それらを実現する機能要素群を統合して、システム全体を構築している。試作したシステムを用いて電子顕微鏡下で微細組立・接合作業を実現し、その試用を通して得られた知見から、システムの有用性と設計指針の妥当性を検証し、さらにシステムを実現するには工具とパレットの設計が重要であることを指摘している。

第4章では、顕微授精システム、DNA サージェリーシステムの設計・試作を例にあげ、個々のシステムに必要な機能要素のうち、特に工具とパレットの設計に重点をおいてシステムを開発している。実際の試作・試用を通して、前者では従来技術より低侵襲な卵子細胞膜開孔を実現し、後者ではDNAの引き伸ばし・切り取り・移動作業を実現している。この結果から、システムの有用性と設計指針の妥当性を帰納的に評価している。

第5章は「考察」である。第3章および第4章での設計・試作・試用を通して、第2章で提案した操縦形マイクロハンドリングシステムの設計指針を総合的に評価している。また、実際のシステム設計過程や実際のハンドリングを通して得られた知見として、システムを構成する機構要素群のうち特に工具とパレットの設計が重要であることを述べ、その理由を考察している。さらに操縦形マイクロハンドリングシステムの将来展望として、今後の課題と応用方面を述べている。

第6章では、本論文全体の結論を述べている。

以上に述べたことをまとめると、本論文では、特定の微細物に対して機械的な操作を加える作業を実現するために、操縦形マイクロハンドリングシステムの設計指針を提案して、それにしたがってシステムを設計することで、要求機能を実現する設計解の1つを得ることができることを、いくつかの具体例を通して帰納的に実証している。

従来は、新しい要求ごとに、既存の機構を積木のように組み合わせて、試行錯誤して要求を満たすシステムを模索していたのに対して、システムの設計指針を明確に示した本研究は、微細な物体を対象とする工学の発展に大きく貢献すると考える。

さらに本研究で設計解の具体例として開発したシステムはそれぞれ微細組立接合、低侵襲顕微授精、DNA サージェリーという、工学・医学・生化学の各分野で必要とされるマイクロハンドリングを実現している。したがって、本研究は工学と他分野との融合領域の発展にも大きく貢献すると考える。

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。