

## 審査の結果の要旨

氏名 森下 広

本論文は、サブミクロンオーダーの微小対象物を、人間が通常の大きさのものを扱うのと同じ感覚で扱うことの出来るマニピュレーションシステムの構築を目指し、その構成について考察するとともに、構築に必要な機構の構成要素である平行平板構造、平行平板式微小変位発生機構、および一軸粗微動機構の特性および制御方法を明らかにし、その知見を元にサブミクロンマニピュレーションシステムであるナノロボットシステムⅡを構築したものである。本論文は、以下に述べる10章より成る。

第1章は序論であり、人間の知の発達の歴史の中で今、微小な世界が注目されているにも関わらず、微細な対象物を自由に扱うことのできるマニピュレーションシステムが存在しないという本研究の必要性を述べ、本論文の目的をその構築に定めている。また、従来の電子顕微鏡内マニピュレーションシステムの開発の歴史に言及し、それが生物試料の切り出しおよび数百 $\mu\text{m}$ 程度の比較的大きな部品の組み立てに二分されていることを示し、サブミクロンオーダーの対象物を自由に操作できるマニピュレーションシステムが欠けていると主張している。

第2章では、サブミクロンマニピュレーションシステムの理想的な構成を、人の手作業を微小世界で実現するものであるとし、その実現に必要な、微細な動きの生成、作業の立体画像の取得、作業力・作業音検出、作業工具、およびそれら要素の統合制御というマニピュレーションシステムの各機能について述べている。また、微細な動きを生成するロボット部に必要な自由度とその配置について検討し、ナノロボットシステムの具体的な構成方針を述べている。

第3章では、微小世界での作業力を測定する力センサの基本構造である平行平板構造について述べている。平行平板構造は従来から力を測定するための構造として用いられてきたが、本章ではこれまで扱われてこなかった、力センサの精密な設計の際の誤差要因となる角穴隅のRやひずみゲージの検出部長の力センサ出力への影響について論じている。

第4章では平行平板式微小変位発生機構について述べている。平行平板式微小変位発生機構は第3章で扱った平行平板構造に積層型圧電アクチュエータを組み込んだ構造になっているため、第3章で扱ったことに加え、積層型圧電アクチュエータを組み付けた場合の接着剤の影響、平行平板構造の二次的変形の影響を考察している。また、平行平板式微小変位発生機構の設計例を挙げその制御方法についても言及している。

第5章では単一機構による粗動・微動動作の実現と題して、新たに考案した平行平板式微動機構を応用したインチワーム式の粗微動機構について述べている。この粗微動機構は

インチワーム動作により 20mm 程度の大きなストロークの移動が可能であると同時に、停止位置では内蔵された 2 組の平行平板式微小変位発生機構のプッシュプル動作で可動範囲 5  $\mu\text{m}$  の微動を可能としている。

第 6 章ではナノロボットシステム I の開発と評価と題し、微小変位発生機構 3 個と超音波モータを用いて構成したサブミクロンマニピュレーションシステムのプロトタイプであるナノロボットシステム I について、その構成および各部の構造について述べている。また、当該システムを用いて行った微細作業の例を示し、当該システムの試作によって判明した知見、および当該システムを使用して微細作業を行った結果得られた知見を整理している。

第 7 章ではナノロボットシステム II の開発と題し、ナノロボットシステム I 開発の経験に基づいて更にロボット部の自由度を増やすことで、実施できる作業の汎用性を高めたナノロボットシステム II について、その構成および各構成要素の詳細について述べている。

第 8 章ではナノロボットシステム II の評価として、ナノロボットシステム II のロボット部の構成要素である右手ロボット、左手ロボット、ベースステージについて、静的な位置決め特性、指示値を交流的に変化させた時の出力変位の通過帯域特性、粗動時の速度特性等を実験している。またナノロボットシステムのロボット部を走査型電子顕微鏡の試料室内に導入した場合の走査型電子顕微鏡の画像への影響、真空排気時間への影響、および試料室内でのロボット各部の温度上昇についても評価している。

第 9 章ではナノロボットシステム II による微細作業と題し、ナノロボットシステム II を用いて半導体膜のスクラッチテスト、著者以外の物理学者によって行われた直径 1.18  $\mu\text{m}$  の球の積層および 25  $\mu\text{m}$  角の板の積層、半導体表面のアルミニウム配線層の切断、アルミニウムパッド上への 10  $\mu\text{m}$  角の文字の描画等を行い、ナノロボットシステム II で実際にサブミクロンオーダーの作業を行えることを示した。

第 10 章は結論であり、本論文の成果をまとめるとともに、将来課題を示している。

以上述べたように、本論文は、走査型電子顕微鏡内で作動するサブミクロンマニピュレーションシステムの構築のために必要となる基本的な微小変位発生機構の解析に始まり、プロトタイプシステムの構築を経て実用的なシステムの構築までを行うことで、サブミクロンオーダーのマニピュレーションシステムの構成法を示した論文であり、工学への寄与が大きいと認められる。

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。