

|         |  |
|---------|--|
| 氏名(本籍)  | 櫻田 陽(秋田県)  |
| 専攻分野の名称 | 博士(工学)   |
| 学位記番号   | 工博甲第226号   |
| 学位授与の日付 | 平成28年3月22日   |
| 学位授与の要件 | 学位規則第4条第1項該当   |
| 研究科・専攻  | 工学資源学研究科・生産・建設工学専攻   |
| 学位論文題名  | ダンパを適用したPZT精密位置決め機構の制御に関する研究   |
| 論文審査委員  | (主査)教授 長縄明大 (副査)教授 土岐 仁<br>(副査)教授 渋谷 嗣 (副査)教授 村岡幹夫<br>(副査)学外審査委員 砂子田勝昭 |

## 論文内容の要旨

近年では、科学技術の急速な発展に伴い、高度情報化社会の進展が目覚ましく、ナノテクノロジーを支える基盤技術として、ナノスケールでの位置決め技術がより一層必要とされている。その中で、生産性の向上や研究開発の効率化を図るため、位置決め技術の高速化も同時に必要とされている。このような精密位置決めを実現するアクチュエータとして、積層型圧電素子(以下 PZT)がその微小な変位量を拡大する機構と組み合わせて用いられる場合が多い。これまで、多くの PZT 精密位置決め機構が研究開発されてきたが、申請者が行ってきた機構のように、 $300\mu\text{m}$  までの動作範囲を確保しながら、位置決め機構の共振周波数を高め、約  $2\text{kHz}$  の制御帯域を実現した機構は存在しない。しかし、位置決め機構の多くは、変位拡大のための機構フレームの弾性変形を利用しており、共振ピーク値が非常に高く、負荷質量の取り付けなどにより、制御性能を確保できないことが懸念されてきた。

そこで、粘弾性材と拘束板からなるダンパを機構フレームに張り付けた結果、共振ピーク値を抑制することができたが、共振周波数より低域側の帯域に、ゲイン特性が数デシベル低減する現象が見られた。しかし、これまで行われてきた研究の中で、このような現象を確認し、位置決め性能に与える影響を明らかにした研究は行われておらず、本現象を解明し、高速高精度制御法について検討することは、ナノスケールでの位置決め技術向上に大きく貢献できるものと考えられる。

そこで本論文では、PZT 精密位置決め機構に、ダンパを適用した場合に生じる現象をモデル化して位置決め性能へ与える影響を明らかにし、さらに制御性能を高めるための実用的な制御手法について検討することを目的とする。

本論文は、6章から構成されており、以下に各章の概要を示す。

第1章では、ナノスケールでの位置決めに用いられている装置の現状について述べ、本研究のPZT精密位置決め機構の特徴、さらにダンパを適用した場合に生じる現象などを述べ、本研究の目的について述べる。

第2章では、PZT精密位置決め機構の概要として、形状、大きさ、材質などについて、また、適用したダンパについてもその構造と材質について述べ、使用した実験装置について述べる。さらに、1軸のダンパを適用した精密位置決め機構の基礎特性として、測定した周波数応答をダンパを適用しない場合と比較し、ダンパを適用すると周波数応答の低域にゲインが低減する現象が生じることを述べる。

第3章では、精密位置決め機構の制御手法として、PID制御法により位置決め制御を行うが、2次遅れ系によるモデル化とそのモデルを用いて設計したコントローラにより位置決め制御を行った場合の結果についても述べる。つぎに、位置決め制御法により得られた結果の問題点、すなわち位置決め応答には、シミュレーションに見られなかったオーバーシュートが生じたため、現状のまま実際の現場で適用すると、予期しない事態が生じる可能性が高い。このため、周波数応答におけるゲインの低減部まで含めた次数の高いモデル化を行い、極・ゼロ点解析や過渡応答シミュレーションを行い、ダンパの適用がオーバーシュートの要因であることを明らかにする。さらに、極・ゼロ点解析で求めた伝達関数から、過渡応答を改善するコントローラを導出し、実際の実験により性能検証した結果についても述べる。

第4章では、第3章で検討した制御系設計手法が、実際の現場では適用が困難であることを述べ、これを簡易に行う方法について述べる。本研究で検討した手法は、位置決め機構のゲインの低減部を、位相遅れ要素で近似的にモデル化し、現場技術者が調整すべきパラメータは、位相遅れ要素の折れ点周波数の一つのみとした点に特徴があり、これを調整することにより制御性能も向上することができる。本手法の有効性は、実験により確認した。

第5章では、ダンパを有するPZT精密位置決め機構を同一平面内の高速位置決めに応用したXYステージのモデル化と制御ダンパを貼り付けたことにより生じるゲインの低減現象について、1軸のダンパを有するPZT精密位置決め機構を直交に配置したXYステージについて述べる。XY軸の1次モードの共振周波数の変化による、相互干渉の影響は無いことを確認し、XY軸共に共振が一つの2次遅れ要素として前章までのモデル化の手法を用いることが可能であることを述べる。XYステージの制御法として、提案したループ整形法に基づくPIDコントローラの設計法を拡張した位相進み補償法が、XY軸に対しそれぞれ独立して設計し、指定通りの制御性能を実現できることを実験により示す。正弦波と同期する余弦波の指令電圧をそれぞれX軸とY軸に与えることにより、2軸同時に制御を行い、直径100  $\mu\text{m}$  のリサージュ円から、XY平面内における位置決めが精度よく行われていることを実験で示す。

第6章では、本研究の結果のまとめと今後の展望について述べる。

以上より、ナノスケールでの位置決めに必要なとされている広い動作範囲と制御帯域の向上を目指すPZT精密位置決め機構に対して、ダンパを適用しても制御性能を低下させることなく、位置決めを実現する方法を明らかにした。今後、様々な応用分野において、本位置決め装置が求められ、導入されて行くことが予想され、これらの分野へ著しく貢献できると期待できる。

## 論文審査結果の要旨

精密位置決め分野では、生産性の向上や研究開発の効率化を図るため、高い位置決め技術と高速化が同時に必要とされており、そのアクチュエータには積層型圧電素子(以下PZT)と変位拡大機構を組み合わせたものが用いられている。例えば、磁気記録評価装置では、磁気ヘッドをトラックフォロイングさせるためPZT精密位置決め機構が導入されており、ハードディスクドライブの大容量化に貢献している。しかし、PZT精密位置決め機構は、変位拡大機構の弾性変形を利用しているため、その周波数特性に高い共振ピークを有しており、取り付けられる負荷質量の変化により制御性能が保証されないことが懸念された。そこで、粘弾性材と拘束板からなるダンパを変位拡大機構に貼り付ける手法が提案されたが、ダンパが位置決め性能に与える影響についてはこれまで明らかにされていない。さらに、走査プローブ顕微鏡で使われているチューブスキャナは、PZTを円筒形に貼り付け、その屈曲変形を利用して走査する方式を採用しているため、Z軸方向の像の歪みが問題になっており、さらに現状の動作範囲を保持したまま同一平面内をさらに高速に走査できる装置が求められている。

本研究では、ダンパを適用したPZT精密位置決め機構に生じる現象を明らかにし、さらに制御性能を向上させる実用的な制御手法について検討する。また、ダンパを適用したPZT精密位置決め機構を平面内走査のためのXYステージへ応用し、その制御性能について検討する。本論文は、全6章で構成されている。

第1章では、精密位置決めに用いられている装置の現状について述べ、本研究のPZT精密位置決め機構の特徴、さらにダンパを適用した場合に生じる現象の概要と研究目的について述べている。

第2章では、ダンパの構造と使用した実験装置などについて述べ、さらに精密位置決め機構の周波数応答を測定し、ダンパを適用しない場合と適用した場合の結果の比較により、ダンパを適用すると共振ピークが抑制されるが、低周波域のゲイン特性が数デシベル低減する結果を示している。

第3章では、PZT精密位置決め機構を制御するため2次遅れ要素によるモデル化と、PIDコントローラ的设计法について述べた後、実験ではシミュレーションに見られなかったオーバーシュートが生じることを示している。そこで、ゲインの低減部まで含めた高次モデ

ルを同定し、極・ゼロ点の解析を行った結果、適用したダンパは位置決めにおいてオーバーシュートを増大させる要因となっていたことが明らかとなった。さらに、実際の現場においてゲインの低減部まで含めた簡易的なモデル化手法、ならびにこのモデルを用いた制御性能の補償法を提案し、その有効性を実験により確認している。

第 4 章では、過渡応答特性をさらに改善するため、ダンパを適用することにより生じるゲインの低減部を、高次の位相遅れ要素で階段状に近似する方法を提案し、高精度にモデル化できることを示している。また、負荷質量を有する場合についても検討し、提案した制御法が指定通りの性能を実現できることを実験により示している。

第 5 章では、PZT 精密位置決め機構を XY ステージへ応用し、ゲイン低減部を含むモデル化と制御性能について検証し、さらにスキャン動作における温度上昇の様子を測定し、位置決め性能に与える影響はほとんどないことを明らかにしている。

第 6 章では、本研究の結果のまとめと今後の展望について述べている。

以上より、本研究では、ダンパを適用した PZT 精密位置決め機構に対して、性能を低下させることなく位置決めを実現するためのモデル化と制御手法を提案し、その有効性を実験により示した。これにより、精密位置決め分野における生産性の向上や研究開発の効率化へ多大な貢献が期待され、工学的な意義も極めて大きいと考えられる。よって、本論文は、博士（工学）の学位論文として十分に価値があると認められる。