

外 96-33

早稲田大学大学院理工学研究科

博 士 論 文 概 要

論 文 題 目

パラレル駆動機構による精密位置決めと
その応用に関する研究

申 請 者

富 田 良 幸

YOSHIYUKI TOMITA

1996 年 11 月

近年、半導体の高集積化とそれに伴う情報機器や光学機器の小型・精密化、さらにX線や各種レーザー光の計測・加工分野への積極的な利用に伴い、様々な機器において10nm前後の精密位置決め技術が必要とされている。従来の位置決め技術は、大きく1)アクチュエータあるいは駆動方式自体に関する技術、2)駆動系の多自由度化技術、3)計測系および駆動系の配置等の駆動システムの構成技術、4)運動制御系の設計技術等到大別できる。これらの研究では、一軸方向に限定した駆動方式あるいはその組み合わせ方を基本としているため構造的に駆動性能が制約される上、制御系設計も複雑となることから、6自由度運動機構としての機構設計法あるいは制御設計法に関する報告例は少ない。このようなことから、本論文では、従来の駆動方式に代わる方式として、複数のアクチュエータあるいはその動力伝達機構により位置決め対象に並列的に駆動力を加えるパラレル駆動機構を取りあげ、10nm程度の位置決め分解能を実現するためのパラレル駆動機構およびその制御方式の設計法を明らかにすることを目的としている。

パラレル駆動機構はStewart(1965)がフライトシミュレータへの応用を目的として開発して以来、主にロボットへの応用を目的として研究されてきた。このため従来の研究は、高速性を重視した機構構成あるいはそれを実現するための運動学的見地に立つものが主であった。本論文では、半導体製造装置やレーザー加工装置等の精密位置決め機構への応用を目的としたパラレル駆動方式に関して、a)各自由度間の干渉を含む駆動部構造の動力学的に基づいた、パラレル型精密駆動機構とその制御系設計法、b)パラレル駆動機構の微細加工システムへの応用の2項目をメインテーマとして検討を行っている。本論文は10章より構成されている。

第1章は序論である。従来の研究例の概要と本研究の位置づけ、目的等について述べている。

第2章では、変位制御素子として圧電素子を用いた6自由度パラレル微動機構の非干渉化設計法について述べている。圧電アクチュエータを用いた6自由度駆動機構では、各アクチュエータの協調運動により対象の位置決めが行われるため各自由度間の干渉を低減する設計法が重要となる。本章では系の動力学的解析に基づき、干渉性が周波数に依存して微分的に増加する性質に注目し、目標帯域内で各自由度間の干渉性を低減するためのアクチュエータの配置方法とその剛性設計法を示している。以上の設計法に基づく試作装置の評価結果より、最低共振周波数170Hz、干渉比5%(120Hz)、駆動分解能5~10nm(x, y), 0.12 μ rad(θ_z)が得られ、提案する設計法が妥当であることを述べている。

第3章では、第2章で述べた6自由度微動機構の位置制御方式について述べている。各圧電アクチュエータへの入力とステージ変位間には、製作精度等による誤差要因を含め静的干渉性が存在し、これが位置決め精度、応答性を劣化させる原因となっている。ここでは、6自由度制御の基本アルゴリズムを示した上で、各自由度間の静的干渉性を補正する方式として、実機特性の逆モデル演算を用い

た静的非干渉化方式を提案している。非干渉化のためのパラメータ調整を繰り返す法により行うことにより、5%以下の非干渉化精度を達成できることを示し、さらに、これらを実現するための制御システムとしてトランスピュータを用いたパラレル処理型制御システムを構成することにより250 μ sの制御周期を実現している。以上の結果、目標値に対する応答周波数帯域として30~40Hz、位置整定後の停止精度10nm以下(x, y), 駆動分解能10nm(x, y), 0.123 μ rad(θ_z)等の結果を得ている。第2章および第3章の結果より、位置制御素子を用いるパラレル駆動方式が、多自由度精密駆動機構の一方式として有効であり、さらにその応用として、微細加工システム用途に対し、粗動機構と組み合わせる方式が実用上有効であることを述べている。

第4章では、第2章および第3章で述べた手法を力制御によるパラレル駆動方式に発展させ、基礎的検討を行っている。具体的手法としてサーフェイスモータを新たに提案し、基本原理とその検証結果について述べている。パラレル駆動を実現するためのモータ部の設計法として、パーミアンス法を2次元推力解析に適用した結果、解析精度は15%以下の誤差で得られることを実験により確認している。さらに、ステージの動力学的モデルを用いて閉ループ系の駆動特性について理論的検討を行った結果、理論値および実験結果は各自由度の干渉特性も含めよく一致することを確認している。また、駆動分解能と応答性についての評価の結果、駆動分解能10nm(x, y), 停止精度10.1nm(x), 5.1nm(y), 0.079 μ rad(θ_z), また応答性として、立ち上がり時間3msを実現している。

第5章では、サーフェイスモータによる実用的なストロークを実現するための駆動機構とその制御方式について検討を行っている。長ストローク化と同時にコンパクトな構造を実現するため、サーフェイスモータを2相化構造としている。さらに制御系として、2相励磁系を含む推力・トルク制御系、および駆動点の幾何学的位置関係を考慮した非干渉化制御系を有する制御系を構成している。以上により、位置決め時の標準偏差(3 σ)は15.7nm(x), 9.5nm(y), 0.104 μ rad(θ_z), 最高速度150mm/s, 応答周波数105Hzを達成している。

第6章では、以上の研究成果を適用して高精度3次元運動を実現するための駆動系構成と制御方式について検討を行っている。ステージの3次元運動モデルを導出し、ピッチングモードを含むx-y平面運動制御系の安定性が駆動点および位置計測点の配置条件により決定されることを示している。その上で、この同相安定化条件を満たす駆動点および位置計測点の配置法により系を高帯域化するとともに、計測点配置によるアップベ誤差の補償を目的とした3次元運動制御系を新たに提案している。機械構成として、圧電素子を用いた微動機構とサーフェイスモータとの組み合わせによりストローク200mm(x, y), 30 μ m(z)を有するステージとして実現している。次に、サーフェイスモーターおよび圧電素子による6自由度制御系の解析設計を行っている。この中で、特に、x-y平面運動制御系に外乱オ

ブザーバを適用し軸間干渉の低減，外乱に対する制御精度の向上を図っている．以上の設計の有効性を実験により評価した結果， x y 方向の運動性能として分解能 10nm，応答性約 120Hz，ピッチング・ローリング精度 $0.8\mu\text{rad}(\theta_x)$ ， $1.5\mu\text{rad}(\theta_y)$ の高精度 6 自由度制御を実現している．

第 7 章では，パラレル駆動機構の実際の精密機器への応用例の一つとして， X 線を光源とする半導体露光装置（SR ステッパー）への具体的応用設計，実証結果について述べている．露光精度を実現するためのエラーバジェット法について述べ，システム各要素の必要精度の分析法を明らかにしている．次に，縦型ステッパーの基本構成と各要素の構成，単体性能評価結果について述べている．アライメント制御系の制御精度および 2 重露光実験による重ね合わせ精度の評価の結果，アライメント精度 27.0～47.0nm，重ね合わせ精度 41～46nm，総合精度 56～62nm（いずれも 3σ ）を得ている．さらに誤差要因の分析からアライメントフォーカス補正方式を行うことで総合精度 38～50nm を達成している．ここで，第 2 章および第 3 章に述べたパラレル微動機構は，ボールネジ駆動による X Y ステージと組み合わせた粗微動型縦型 X Y ステージとして実用化されている．

第 8 章では，パラレル駆動機構の他の応用例として，1) 微細穴加工装置（トレパニングシステムと呼ぶ）の光学ヘッド駆動機構，2) 電子回路基板のレーザー接合等，高速ステッピング動作を目的とした X Y ステージの 2 例について述べている．1) では，トレパニングシステムの光学系駆動機構にサーフェイスモータ駆動機構を応用し，高精度・高応答特性を実現している．本設計では，誤差要因分析に基づく機構系と制御系の精度設計を行い，レーザー光焦点の軌跡精度を確保している．加工精度の評価の結果，穴径 $260\mu\text{m}$ の設定に対し平均誤差 $-18\sim 7\mu\text{m}$ ，ばらつき $47\mu\text{m}(3\sigma)$ の結果を得ている．本システムは，電子部品や精密機械部品の加工用途に実用化されている．2) では，第 6 章で述べた 6 自由度系としてのモデリング，解析に基づき系の安定化条件を明確化し，コイルの剛性と駆動点・計測点配置の設計を行っている．また，制御系として，外乱オブザーバによる加速度制御系，およびジャーク連続軌跡生成法の設計について述べている．以上の結果，2.54mm ステッピング動作に対し 37ms の整定時間 ($\pm 10\mu\text{m}$) を実現し，さらに，ステージ位置による応答特性のばらつきが効果的に低減されることを示している．

第 9 章では，多自由度パラレル駆動方式を用いた精密位置制御技術の今後の工業的展開について述べている．

第 10 章は結論であり，これまでの各章の成果をまとめている．

以上の結果より，位置制御素子と力制御素子を用いたパラレル駆動機構の機構構成とその動力学設計法，制御設計法を明らかにし，精密駆動方式の一設計手法を明らかにしている．これらの要素技術は，実際のシステムに応用され実用化されている．