

京都大学	博士 (工学)	氏名	藤田 智哉
------	---------	----	-------

論文題目	高精密送り系の開発に関する研究
------	-----------------

(論文内容の要旨)

近年、医療、光学、精密機械分野などで 100 ナノメートルレベルの形状・寸法精度と 10～100 ナノメートルレベルの表面粗さが必要な部品や金型等の高精密切削加工の要求が高まっている。本論文は、高精密切削加工に必要な送り系の開発課題において、高速輪郭運動時に生じる動的な誤差を機構要素学、力学、制御工学の観点から解析し、新しい補償法と送り機構を提案したものであり、9章からなる。

第1章では、高精密送り系の必要性和過去の研究について概観し、本研究の開発目標とその位置づけについて述べている。

第2章では、高精密切削加工の要求精度、生産性、特徴について述べるとともに、加工対象を設定し、高精密送り系に要求される位置決め精度、運動精度、移動速度、加速度、制御系の帯域についての具体的な仕様を検討している。さらに、現状の送り機構の技術課題について整理している。具体的には、ボールねじ機構とリニアモータを用いたダイレクトドライブ機構を用いて要求性能を達成する場合の問題を分析し、それぞれの研究課題を設定している。

第3章では、ダイレクトドライブ機構を用いた高精密送り系の開発を行い、その運動性能の評価を行った結果をまとめている。具体的には、負荷容量・剛性が高く、負荷変動が少ないころがり案内と高推力コアレスリニアモータを用いた送り系を開発して3軸の加工機に搭載し、サーボ系の遅れと機械の動的な変形を補償するサーボ系を実装し、高速輪郭運動時の運動誤差を測定実験で評価している。この結果から、ころがり案内の摩擦力が運動条件で変化することがサブミクロンオーダの運動精度を阻害する要因となることを見い出している。

第4章では、第3章で述べたころがり案内の摩擦力の変動の解析手法について述べている。従来のころがり案内の摩擦力は、移動体反転後の移動距離をマイクロ領域、遷移領域、マクロ領域とわけて実験的に解析がされてきたが、移動体反転後の摩擦力の位置依存性と速度依存性を明確にする評価がされていなかった。また、移動領域が数100ミリメートル以上のときの摩擦力変動についても考慮されていなかった。本論文では、マイクロ～マクロ領域で微小な移動と停止を行う実験方法を考案し、これを用いて、摩擦力の位置依存性(マイクロ特性およびマクロ特性)と速度依存性を明確に分離する方法を提案した。提案手法で、開発機に用いたころがり案内の摩擦力を測定し、摩擦力のマイクロ領域での位置依存性(スティック特性)と速度依存性(スリップ特性)を分析し、スリップ特性が速度に対して変化しストライベック特性を持つことを示した。

京都大学	博士 (工学)	氏名	藤田 智哉
論文題目	高精密送り系の開発に関する研究		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>第5章では、移動する複数のブラシで接触面の力学状態を表現した移動マルチブラシモデルを提案し、このモデルを用いて、ボールを転動体とするころがり案内の摩擦力のモデル化を行った結果について述べている。まず、従来モデルであるシングルブラシモデルでは、ボールと軌道面の相対速度の反転領域での摩擦特性（作動すべりと呼ばれている）を表現できない点を指摘している。提案したモデルでは、接触面の曲率を考慮してボールと軌道面の相対速度を計算し、相対速度が同じ領域をストライプと定義して、各ストライプに進入したブラシが飽和に達するまでは線形のばね力が発生し、その後はすべり力を発生するとしている。このモデルにより、移動体反転後の過渡状態から定常速度状態での摩擦力が相対速度分布に影響を受けることを示した。そして、測定実験で開発したころがり案内の摩擦力のマイクロからマクロ領域でのモデル化が可能なことを示している。</p> <p>第6章では、カフィードフォワード制御系に実装するための摩擦モデルの設計法について述べている。第5章で提案した移動マルチブラシモデルの各ストライプでの摩擦力が移動距離に対してヒステリシス特性を持ち、かつその変化率がボールと軌道の相対速度に依存する性質を利用し、ストライプの数によって摩擦力の近似レベルを決定する方法を提案している。提案手法で、開発した送り系のころがり案内の摩擦力の制御モデルを設計し、シミュレーションでその効果を検証している。</p> <p>第7章では、ボールねじ送り機構のねじ軸の縦振動により制御帯域が制限される問題を解決するために、圧電アクチュエータを用いた微動機構をボールねじ（粗動）機構に統合した粗微動型の複合サーボ機構を開発している。微動機構においてはボールねじの支持軸受外輪を圧電アクチュエータで運動させ、ねじ軸を介して高速にテーブルを運動させることができること、ならびに粗微動機構で高精度な輪郭運動ができることを示した。</p> <p>第8章では、前章で開発した送り機構を用いて、工具運動精度を向上するため、工具と工作物の間の相対変位をリアルタイムで推定し、微動装置で高速に運動誤差を補正する方法を提案して、実機上でその効果を検証している。</p> <p>第9章は本論文の結論であり、得られた成果について要約している。</p>			

氏名	藤田 智哉
----	-------

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、高精密切削加工に必要な送り系の開発課題において、高速運動時に生じる動的な誤差を機構要素学、力学、制御工学の観点から解析して、新しい補償法や送り機構を提案したものであり、得られた主な成果は以下の通りである。

1. 負荷容量・剛性が高く負荷変動が少ないころがり案内と推力が大きなコアレスリニアモータを用いた送り系を開発して実機に搭載し、運動性能を評価した。評価結果から、ころがり案内の摩擦力が運動条件で変化することが高精度運動の阻害要因となることを見出した。
2. ころがり案内の摩擦力変動を実験的に解析するために、マイクロ～マクロ領域で微小な移動停止を行う実験方法を考案し、これを用いて摩擦力の位置依存性（マイクロ特性およびマクロ特性）と速度依存性を明確に分離する方法を提案した。提案手法で、開発機に用いたころがり案内の摩擦力を測定し、摩擦力のマイクロ領域での位置依存性（スティック特性）と速度依存性（スリップ特性）を分析し、スリップ特性が速度に対して変化しストライベック特性を持つことを示した。
3. ボールを転動体とするころがり案内の接触面の力学状態を、移動する複数のブラシで表現した移動マルチブラシモデルを提案し、このモデルを用いて、ボールを転動体とするころがり案内の摩擦力のモデル化を行った。また、このモデルをフィードフォワード制御器に実装する方法を示した。
4. ボールねじ機構を用いた送り系では、ねじ軸の縦振動により制御帯域が制限されるという問題を解決するために、圧電アクチュエータを用いた微動機構をボールねじ（粗動）機構に統合した粗微動型の複合サーボ機構を開発している。また、開発した送り機構を用いて、工具運動精度を向上するため、工具と工作物の間の相対変位をリアルタイムで推定し、微動装置で高速に相対変位を補正する方法を提案して、実機上でその効果を検証している。

以上、本論文は、高精度送り系の開発と評価法を体系的に示したものであり、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成 24 年 2 月 22 日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。