

氏名	アハメド アリー ディア モハメド サーハン Ahmed Aly Diaa Mohammed Sarhan
学位(専攻分野)	博士(工学)
学位記番号	工博第2795号
学位授与の日付	平成19年3月23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	工学研究科精密工学専攻
学位論文題目	Monitoring of Cutting Forces by the Intelligent Spindle (知能化主軸による切削抵抗の監視)
論文調査委員	(主査) 教授 松原 厚 教授 吉村 允孝 教授 松久 寛

### 論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、エンドミル加工制御のためのプロセス情報として重要な切削抵抗を監視する機能を持つ知能化主軸の開発に関する研究をまとめたものであり、次の7章からなる。

第1章は緒論であり、工作機械主軸の高速化の動向と加工機の知能化の動向について述べ、次世代のNC工作機械主軸には、切削抵抗の監視機能と制御機能が必要であることを述べている。

第2章では、種々の切削抵抗監視システムの開発と研究動向についてレビューしている。切削抵抗の監視には、ひずみゲージを主軸の構造体に装着する方法、力センサを加工のカループに設置する方法、主軸の変位を測定し変換する方法等があるが、本研究では、エンドミル加工における半径方向の切削抵抗を高精度に測定することを目標とし、ロバスト性、メンテナンス性において有利な変位センサを用いる方針をとることを示している。

第3章では、従来の変位センサを用いた切削抵抗の監視法の問題を明らかにしている。2つの変位センサを実機の主軸に装着し、実験から得られた主軸変位と負荷の関係を用いて、実加工における半径方向の切削抵抗を監視する実験を行っている。この結果から、切削抵抗の変動が大きい場合や監視時間が長い場合には、切削抵抗の監視誤差が生じることを明らかにした。

第4章では、切削抵抗の監視誤差の要因について整理し、各要因の影響を分析している。まず、互いに対抗する2組の変位センサを用いて、センサノイズ、遠心力や熱による主軸の膨張の影響を低減した主軸回転変位測定法を考案している。さらに主軸の無負荷時のエラーモーションを高速でサンプリングし、負荷時のサンプリングデータを補正することで、主軸負荷に起因する主軸変位を高精度に測定できる信号処理システムを構築している。この測定システムを実際のマシニングセンタの主軸に搭載して、主軸の無負荷回転実験や負荷実験を行い、主軸の回転数、静剛性、主軸温度、軸方向負荷の変化が切削抵抗の監視誤差へ与える影響を実験により体系的に調べている。この結果、種々の誤差要因の中で、主軸回転に起因する熱変位は切削抵抗の監視の大きな誤差要因であることを示した。特に、問題となる熱変位は、主軸回転に伴う発熱による主軸温度の上昇と冷却制御に伴う温度ゆらぎにより発生していることを明らかにした。

第5章では、第4章で示した主軸の熱変位による切削抵抗の監視誤差を低減するため、機械に装着した温度センサ情報を用いて熱変位の補正を行う方法を検討している。問題となる熱変位は、主軸の発熱、主軸冷却制御、機械の設置環境の影響を受ける。従って、これらの影響を観測しやすい温度センサ配置を決定し、主軸を様々な回転数で運転したときに得られた温度と主軸変位との測定データに対して、重回帰分析を行っている。重回帰分析により得られた温度データによる熱変位の推定式を用いて熱変位補正を行うことにより、熱変位に起因する切削抵抗の監視誤差を10N(RMS値)に低減できることを示した。

第6章では、第5章までに構築したシステムを用いて、種々の加工における切削抵抗監視実験を行っている。様々な加工パターンを含むポケット加工、工具摩耗を伴う長時間の溝加工、および工具破損の危険性がある高負荷段加工において、構

築したシステムの切削抵抗の監視精度を評価した。ヘリカルパス、スパイラルパス、トロコイドパス等の複雑なパターンを持つポケット加工において、50～1200Nの変動幅を持つ切削抵抗を20N（RMS値）の誤差で監視できることを示した。溝加工においては、熱変位補正の効果により、250mmの切削長に対して20N（RMS値）以下の誤差で切削抵抗の監視が実現できることを示した。2000Nを越える高負荷加工においては、65N（RMS値）程度の監視誤差となったが、この誤差がZ方向の切削抵抗と相関があることを明らかにした。

第7章は結論であり、本論文で得られた知見をまとめている。

## 論文審査の結果の要旨

本論文は、エンドミル加工制御のためのプロセス情報として重要な切削抵抗を監視する機能を持つ知能化主軸の開発に関する研究をまとめたものであり、得られた主な結果は以下の通りである。

1. 対向する2組の変位センサを用いて、センサノイズ、遠心力や熱による主軸の膨張の影響を低減した高精度な主軸回転変位測定法を考案した。主軸の無負荷時のエラーモーションを高速でサンプリングし、負荷時のサンプリングデータを補正することで、負荷に起因する主軸変位のみを高精度に測定できる信号処理システムを構築した。このシステムを実際のマシニングセンタの主軸に搭載して、エンドミル加工実験を行い、主軸変位と半径方向の切削抵抗の関係を実測してモデル化することで、切削抵抗を高精度に監視できることを示した。

2. 切削抵抗の監視誤差を発生させる外乱要因として、主軸の回転数、主軸の静剛性の変化、主軸の熱変位、軸方向負荷を挙げ、これらの影響度合いを実験で調査し、熱変位が切削抵抗の監視誤差を発生させる大きな要因であることを明らかにした。主軸頭温度、主軸冷却油の温度、加工機の機体温度と主軸変位やダミー工具変位の測定結果を分析し、問題となる熱変位は、回転に伴う主軸温度の上昇と主軸の冷却制御に伴う温度ゆらぎにより発生していることを明らかにした。主軸を様々な回転数で運転して得られた温度と主軸変位との測定データに対して、重回帰分析を行った。得られた回帰式を用いて熱変位補正を行うことにより、熱変位に起因する切削抵抗の監視誤差を10N（RMS値）に低減できることを示した。

3. ケーススタディとして、切削抵抗の変動が大きい加工パスを含むポケット加工、工具摩耗を伴う長時間の溝加工、および工具破損の危険性がある高負荷加工において、構築したシステムによる切削抵抗の監視精度を評価し、提案した切削抵抗監視法の有効性を示した。

以上、本論文は、センサーフュージョンの手法を用いた切削抵抗の監視機能の開発法について体系的に研究したものであり、学術上、実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19年2月19日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。