



工作機械の熱変位抑制と熱変位補償システムに関する研究

千田, 治光

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

2006-03-25

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲3684

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1003684>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



【 3 1 0 】

氏 名・（本 籍） 千田 治光 （ 愛知県 ）

博士の専攻分野の名称 博士（工学）

学 位 記 番 号 博い第408号

学位授与の 要 件 学位規則第5条第1項該当

学位授与の 日 付 平成18年3月25日

【 学位論文題目 】

工作機械の熱変位抑制と熱変位補償システムに関する研究

審 査 委 員

主 査 教 授 森脇 俊道
教 授 吉村 武晃
教 授 白瀬 敬一

短期間にコストを抑えた製品の開発・製造を行うため、工作機械を無人でしかも高速で稼働させることが多くなってきた。そして高品質な製品を安定的に生産するため工作機械の熱変位による加工精度の劣化が重要な問題として認識されている。熱変位の中でも、内部発熱による熱変位の代表である主軸の熱変位や送り軸の熱変位、ならびに周囲の温度変化による熱変位は加工される製品の寸法変化に大きく影響することから、従来より多くの研究が成されてきた。しかし、実用的な観点からの検討は少なく、これまでの研究成果を現実利用することが困難であることから、現在生産されている工作機械の熱変位対策には熱源近傍の強制冷却が行われる程度に留まっていることが多い。そこで、本研究では工作機械の送り軸に用いるボールねじの熱変位を抑制する設計手法を提案するとともに、設計による改善のみでは抑制することが困難な主軸の熱変位と構造の熱変位については実時間で精度よく熱変位を推定する方法を提案し、具体的に熱変位補償システムをマシニングセンタに構築することで、その効果の検証を実施している。

本論文は、全5章から構成されており、各章の概要は以下のとおりである。

第1章「緒論」では、多機能化と無人化が要求される工作機械市場のニーズによって、一層の熱変位対策が必要となっている状況を述べている。そして、これまでの工作機械の熱変位対策に関する研究を概説し、まとめることで、本研究の工学的・工業的な位置付けを行った上で、本研究の目的について述べている。

第2章「ボールねじの熱変位抑制」では、工作機械の送り機構に広く使用されるボールねじについて、熱変位の抑制のため多く用いられているボールねじへの予張力（プリテンション）による熱変位の抑制メカニズムを明らかにしている。特に、プリテンションをかけることで熱による変位が生じない中立点をナット動作範囲内に発生させることができ、その位置はボールねじの支持剛性比率で決まることを示している。そして、精度に対する要求が厳しい旋盤のX軸を取り上げ、加工時の動作範囲の中心と熱変位の抑制が必要な位置が異なることに注目し、ボールねじの不均一な温度分布が熱変位に及ぼす影響を明らかにすると共に、その場合の最適な熱変位抑制設計方法について提案している。さらに、加工径が異なる場合では動作基点位置が変わるためにボールねじの不均一な温度分布が変化する状況において、最適設計された送り軸では熱変位が最小となる位置とナット動作基点の位置がほぼ線形の関係にあるため、加工径の変化に応じて支持剛性を変える必要はないことを明らかにしている。

第3章「マシニングセンタ主軸の熱変位抑制」では、実際に製造された立形マシニングセンタについて複数台の軸受外輪温度上昇と主軸熱変位の関係を調べている。そして、主軸構造が同じであれば、定常状態において軸受外輪温度上昇と主軸熱変位の関係は比例関係を示すが、回転速度と軸受温度上昇（主軸熱変位）には個体差があることを明らかにしている。さらに、熱変位と軸受温度変化の時定数を用いて、過渡状態における関係を検証

する方法を提案して確認した結果、温度変化には定常状態に加え、過渡状態においても熱変位を高精度に推定する情報を有していることを明らかにしている。以上から、主軸熱変位を推定して補償するシステムを量産実用する場合には、軸受温度を使って推定する方法が有効であること示している。また、主軸の熱変位特性として、回転速度の変化によって主軸端や工具周囲の空気との熱伝達率が変化するため、回転速度が異なると熱変位時定数も変化することを明らかにしている。他方でこの場合の軸受温度時定数は主軸回転速度の変化による影響を受けない。そして、軸受温度上昇の変化から一次遅れ系の伝達関数を用いて相当熱入力を解析的に推定し、その変化を入力として伝達関数を用いて熱変位を推定する方法について、簡単な演算で実現する手法を提案した。ここではさらに、先の回転速度で時定数が変化する主軸特性を考慮することで、熱変位の過渡状態から定常状態、さらに、過渡状態の連続である場合でも高精度に熱変位を推定できることを示している。また、本提案の熱変位推定方法を用いた補償システムを横形マシニングセンタに構築し、主軸熱変位が加工表面に影響する条件で加工した結果、補償システムを適用しない場合に対して大幅に加工精度が改善されることを確認している。

第4章「マシニングセンタの外部環境温度が変化した場合の熱変位抑制」では立形マシニングセンタにおいて、環境温度が変化した場合の主軸－テーブル間の相対間変位を構造各部の熱膨張量を算出して合算することで求める熱変位モデルを提案している。ここでは環境温度が変化する条件下で、切削水を吐出した場合と吐出しない場合の熱変位と構造各部の温度変化を測定することで、熱変位モデルの温度変位変換値を同定できることを示している。さらに、その手法を用いて同定した熱変位モデルに対して、極端な条件として環境温度が急激に変化した場合と、切削水の温度上昇が加わった場合での推定精度を確認した結果、いずれの場合においても高精度な熱変位の推定ができることを明らかにしている。また、本提案の環境温度が変化した場合の熱変位推定方法と第3章で示した主軸熱変位の推定方法を融合した熱変位補償システムを立形マシニングセンタに構築し、環境温度が変化する条件下で加工した結果、熱変位による加工誤差が十分に抑制されていることを確認している。以上から、本提案の熱変位補償システムは、温度センサを構成要素に内蔵するだけの単純なシステムであり、熱変位を推定する計算も容易であることから、システムとしての信頼性が高く、コストも安価に実現できるため、量産している工作機械への適用に有効であると結論づけている。

第5章「結論」では、本研究により得られた成果をまとめると共に、今後の課題を述べている。

氏名	千田 治光		
論文 題目	工作機械の熱変位抑制と熱変位補償システムに関する研究		
審査委員	区 分	職 名	氏 名
	主 査	教授	森脇 俊道
	副 査	教授	吉村 武晃
	副 査	教授	白瀬 敬一
	副 査		
	副 査		
要 旨			
機械産業においては、短期間でコストを抑えた製品の開発・製造を行うため、工作機械を無人でしかも高速で稼働させることが求められている。その中で機械加工においては特に、高品質な製品を安定的に生産するために工作機械の熱変位による加工精度の劣化が重要な問題として認識されている。熱変位の中でも、工作機械の内部発熱による熱変位の代表である主軸の熱変位や送り軸の熱変位、さらに周囲の温度変化による熱変位は加工される製品の寸法変化に大きく影響することから、従来より多くの研究が行われてきている。しかしながらこれらの研究においては、実用的な観点からの検討は必ずしも十分ではなく、現在生産されている工作機械の熱変位対策としては熱源近傍の強制冷却が行われる程度に留まっていることが多い。本研究は工作機械の送り軸に用いるボールねじの熱変位を抑制する設計手法を提案するとともに、設計による改善のみでは抑制することが困難な主軸の熱変位と構造の熱変位について、実時間で精度よく熱変位を推定する方法を提案し、具体的に熱変位補償システムをマシニングセンタに構築することでその効果の検証を実施している。 本論文は、全5章から構成されており、各章の概要は以下のとおりである。 第1章「緒論」では、多機能化と無人化が要求される工作機械市場のニーズによって、一層の熱変位対策が必要となっている状況を述べている。そして、これまでの工作機械の熱変位対策に関する研究をまとめて検討することによって、本研究の工学的・工業的な位置付けを行った上で、本研究の目的について述べている。 第2章「ボールねじの熱変位抑制」では、工作機械の送り機構に広く使用されるボールねじについて、熱変位の抑制のため多く用いられているボールねじへの予張力（プリテンション）による熱変位の抑制メカニズムを明らかにしている。特に、プリテンションをかけることで熱による変位が生じない中立点をナット動作範囲内に発生させることができ、その位置はボールねじの支持剛性比率で決まることを示している。そして、精度に対する要求が厳しい旋盤のX軸を取り上げ、加工時の動作範囲の中心と熱変位の抑制が必要な位置が異なることに注目し、ボールねじの不均一な温度分布が熱変位に及ぼす影響を明らかにすると共に、その場合の最適な熱変位抑制設計方法について提案している。さらに、最適設計された送り軸では熱変位が最小となる位置とナット動作基点の位置がほぼ線形の関係にあるため、加工径の変化に応じて支持剛性を変える必要はないことを明らかにしている。 第3章「マシニングセンタ主軸の熱変位抑制」では、実際に製造された立形マシニングセンタについて複数台の軸受外輪温度上昇と主軸熱変位の関係を調べている。そして主軸構造が同じであれば、定常状態において軸受外輪温度上昇と主軸熱変位の関係は比例関係を示すが、回転速度と軸受温度上昇（主軸熱変位）には個体差があることを明らかにしている。さらに、熱変位と軸受温度変化の時定数を用いて、過渡状態における関係を検証する方法を提案して確認した結果、過渡状態においても熱変位を高精度に推定する情報を有していることを明らかにし、一次遅れ系の伝達関数を用いて熱変位を推定する方法を提案している。ここではさらに、熱変位の過渡状態から定常状態、さらに過渡状態の連続である場合でも高精度に熱変位を推定できることを示している。また、本提案の熱変位推定方法を用いた補償システムを横形マシニングセンタに構築し、主軸熱変位が加工表面に影響する条件で加工した結果、補償システムを適用しない場合に対して大幅に加工精度が改善されることを確認している。 第4章「マシニングセンタの外部環境温度が変化した場合の熱変位抑制」では立形マシニングセンタにおいて、環境温度が変化した場合の主軸－テーブル間の相対変位を構造各部の熱膨張量を算出して合算することで求める熱変位モデルを提案し、極端な条件として環境温度が急激に変化した場合と、切削水の温			

度上昇が加わった場合での推定を行った結果、いずれの場合においても高精度な熱変位の推定ができることを明らかにしている。また、本提案の環境温度が変化した場合の熱変位推定方法と第3章で示した主軸熱変位の推定方法を融合した熱変位補償システムを立形マシニングセンタに構築し、環境温度が変化する条件下で加工した結果、熱変位による加工誤差が十分に抑制されていることを確認している。

第5章「結論」では、本研究により得られた成果をまとめると共に、今後の課題を述べている。

本研究は、高精度の加工を行う上で重要な工作機械の熱変形に対し、熱変形の影響を少なくする設計を実現するとともに、実加工中の熱変形を推定してそれを補償するシステムを開発してその有用性を確認したものであり、有益な知見を与えた価値あるものと認める。よって学位申請者の千田治光は、博士（工学）の学位を得る資格があると認める。