

学 位 論 文 要 旨

Dissertation Abstract

少数位置の温度測定による
CNC 旋盤熱変形予測式の効率的な決定方法
Efficient method of determining equations for
thermal deformation prediction of CNC lathe
with temperature measurements at a few specific points

金沢大学大学院 自然科学研究科 機械科学専攻

石野 嘉章

Abstract

This study presents an efficient method of determining equations for the thermal deformation prediction of CNC lathes. Although the thermal deformation of machine tools often reduces their accuracy, it cannot necessarily be prevented by assuring their rigidities, etc. Therefore, this study tries to compensate for the thermal deformation of the CNC lathe by predicting their variations and adjust the position of the tool according to predicted values. The previously proposed method determined a prediction equation of the thermal deformation in the CNC lathe by measuring the temperature variations at a few specific points of the body. Although the equation can be applied to the cutting conditions without cutting fluid, the major cutting condition uses cutting fluid. Thus, this study tries to compensate the previous equations in order to be applied to the condition with cutting fluid by introducing the calibration coefficients. Then, we tried to determine the calibration coefficients to be applicable under wide machining conditions using a few experimental results determined by the experimental design. Furthermore, this study proposes a method for easily determining the equations for thermal deformation prediction of various CNC lathes. The method classifies the temperature change tendency in each measured position of the machine tool and narrows down the temperature measured values to be used. The thermal deformation prediction equation is obtained by determining the optimum combination from these measurement positions. In addition, this study shows that the setting of the condition of the experiment became easy by introducing All-pair testing as experiment design and that the number of tests can also be reduced.

工作機械の加工精度に影響をおよぼす種々の変形において、剛性の向上では低減が困難な熱変形に対して、様々な対策が検討されている。例えば熱源や潤滑油の冷却によって発熱を抑制する手法があるが、コストや消費エネルギーの増加をともなう恐れがある。

そこで、工作機械の熱変形の発生は許容し、その影響を解析などにより予測して熱変形の補正を実施する方法が研究されている。解析は演算装置や手法の発展により、高精度な熱変形予測を可能としているが、詳細なモデルの構築や多数位置での温度測定が必要であり、実時間での実施は困難である。そこで、少数位置の温度測定結果から工作機械の熱変形を予測し、補正する方法が実用的な観点からは望まれる。

これまでに、CNC 旋盤を対象として、熱変形で生じる寸法変化を主軸と刃物台間の相対距離(以後、主軸刃物間距離と呼ぶ)の変化と定義し、実際の加工を模擬した動作(以後、切削模擬試験と呼ぶ)中の主軸刃物間距離と機械各部の温度変化の結果を用いることで、熱変形予測式を決定した。この式から得られる予測量を、加工プログラムの指令値から差し引くことで補正を行い、実際に切削油を用いない条件下で良好な補正を行えることを確認した。しかし、旋盤の主な用途は切削油を用いた加工であり、上記の熱変形予測式を、切削油を使用する条件に適用することは困難であることが予想される。

そこで本論文では、これまでの手法で決定した熱変形予測式をまず切削油を使用する条件下に適用可能となるように補正する方法を提案し、その効果を確認している。つぎに、切削油使用の有無を問わず、同一の熱変形予測式が適用可能となるように式に含まれる実験定数の決定を行うことを検討している。なお、適用範囲の拡大においては、実験計画法を用いた試験計画の立案を行うことで、試験範囲の拡大に対して少数の試験実施で可能とすることを提案している。さらに、対象機種を問わず、汎用的かつ効率的に適用可能な熱変形予測式の決定手法を確立することを検討している。また、提案した手法に対して、あらたな実験計画の立案法を用いることで試験条件を緩和するとともに熱変形予測式を決定するための試験数を削減可能としている。

第1章では、本研究の背景と目的、従来の研究について述べる。工作機械に影響を及ぼす影響の1つである熱変形の影響と、その低減方法について列挙し、これらの利点、欠点を比較するとともに、本論文の基礎となった少数の温度測定点から簡便な熱変形予測式で補正を行う方法の必要性を述べる。さらに、同方法の問題点などを示し、本論文の研究に至る経緯を述べている。

第2章では、過去の研究に比べて小形の旋盤を対象に、切削油を用いない状況で実施した切削模擬試験から機械可動部、機械非可動部それぞれで熱変形予測式を決定し、それらの和によって、複雑な熱変形挙動を予測可能とすることを述べている。さらに、同熱変形予測式を、切削油を用いた試験条件に適用可能とするために、同予測式を補正する校正係数を導入する手法を提案し、同手法で決定した熱変形予測式を用いて切削油を用いた条件下で、実際に切削試験(以後、実切削試験と呼ぶ)を切削時における主軸刃物間距離の補正を行いながら実施し、同予測式を用いることで、良好に補正を行えることを確認している。

第3章では、第2章で述べた熱変形予測式の補正方法が、切削油の有無に応じて校正係数を変更しなければならないことを指摘し、予測式の適用範囲を拡大することで、校正係数の変更を不要とすることを検討している。ただし、熱変形予測式の適用範囲を拡大するためには、実験定数などを決定する試験が増加する可能性があるため、実験計画法を用いた試験立案によって、その数を比較的少数とすることを検討している。実験計画法を用いて決定した試験条件にしたがい、切削油の有無両条件下で実施した試験結果を用いることで、切削油使用の有無で切り替え不要な校正係数を決定している。切削油使用の有無両条件下で、同校正係数を用いた補正を行いながら実切削試験を実施し、その

補正効果を確認している。これにより、実験計画法を用いることで、熱変形予測式決定のための試験実施数を比較的少数に抑えることが可能であることを述べている。

第4章では、少数位置での温度測定値から熱変形を予測する式に関し、様々な機種において容易に決定可能とする、汎用的な熱変形予測式の決定方法を確立している。そのために、これまで多数の実験結果からの考察、経験などにより決定していた温度測定位置の選択に関して、第3章で提案した実験計画による切削試験結果から、数十か所の温度測定位置での温度変化傾向を求めて、それらにおける互いの類似性から、測定位置の分類を行うことを提案している。さらに、分類された温度測定点から、代表とすべき位置をそれぞれ1箇所程度選定し、それらの位置での温度変化量を変数とする熱変形予測式に用いる温度測定点候補とする。この候補から数箇所を選択し、それらを組み合わせによって得られる熱変形予測式の候補を用いて、実際に熱変形量を近似することで、適切な熱変形予測式と、同式に含まれる実験定数の決定を行うことを提案している。さらに、以上の方法を用いて、複数の機種で補正試験を実施して、その有用性を示している。

第5章では、第4章において実験計画法における因子と水準の制約によって、L9直交表で決定した条件を切削油使用の有無両条件下でそれぞれ実施する必要があったことに対し、分散分析を行うことで各因子が熱変形に及ぼす影響を評価し、最も影響の小さな因子を、新たに設定した切削油の影響を含む因子に変更することで、試験実施数を削減することを検討している。その結果、一部の試験条件において良好な補正が行えず、試験数削減には本提案とは異なる手法によって、切削油使用の有無の影響を考慮する必要があることを述べている。

第6章では、第4章で用いた実験計画法と比較して因子および水準に対する制約の少ない All Pair 法を用いて、切削油使用の有無を因子として取り扱うことで、より少数の試験実施によって熱変形予測式を決定することを検討している。その結果、All Pair 法を用いることで、切削試験などの数を減少させながらも、同程度の補正効果を得ることが可能な熱変形予測式が決定可能であることを述べている。また5章と同様に試験結果に対する分析から、特定の水準を含む試験条件を省くことで、より少数の試験結果から熱変形予測式を決定することを検討している。

第7章では、本論文で得られた結果を要約して述べている。

学位論文審査報告書（甲）

1. 学位論文題目（外国語の場合は和訳を付けること。）

少数位置の温度測定による CNC 旋盤熱変形予測式の効率的な決定方法

Efficient method of determining equations for thermal deformation prediction of CNC lathe with temperature measurements at a few specific points

2. 論文提出者 (1) 所 属 機械科学 専攻

(2) 氏 名 ^{ふり} ^{がな} ^{いしの} ^{よしあき}
石野 嘉章

3. 審査結果の要旨（600～650字）

当該学位論文に関し、令和3年8月2日に第1回学位論文審査委員会を開催し、提出された学位論文および関連資料について詳細に検討した。同日令和3年8月2日に口頭発表後、第2回学位論文審査委員会を開催し、慎重に協議の結果、以下の通り判定した。

工作機械の熱変形は加工精度に影響を及ぼすが、その対策は容易でなく、効率的な方法の確立が求められている。本論文では、工作機械の少数位置の温度測定値を用い、工具と主軸刃物間距離の変化を予測して熱変形の影響を補正する式に関し、既に確立した式において校正係数を導入することで、同式の使用範囲を拡大できることを示している。また、実験計画で立案した少数条件下での測定値により同係数を決定することで、同式の使用範囲を効率的に拡大できることを示している。さらに、汎用的な熱変形予測式の決定方法として式形を工作機械の少数位置の温度測定値とする線形和の多項式とし、測定位置の候補を温度変化傾向の類似性を考慮して選択し、実験計画で立案した少数の測定値を近似することで、最適な温度測定位置と実験定数を決定する方法を提案している。

以上より本論文は、工作機械の熱変形の影響を効率的に抑制する方法を提案しており、また、同方法は様々な工作機械に適用可能な汎用的な手法であることから、学術的ならびに工学的貢献度は高い。よって、本論文は博士（工学）論文に値すると判定する。

4. 審査結果 (1) 判定（いずれかに○印） 合格・不合格

(2) 授与学位 博士（工学）