

論文の要旨

題目 深層学習によるターニングセンタの熱変位推定と抑制に関する研究
(A Study on Prediction and Compensation of Thermal Displacement of Turning
Center Based on Deep Learning)

氏名 成松 宏一郎

高齢化などによる生産年齢人口の減少により、先進国の製造業において自動化や省人化の需要が高まっている。工作機械による生産活動で省人化や自動化を達成するには、熟練工の知識や経験に基づいた加工条件の調整などを行わなくても、長い期間にわたって加工精度を維持することが重要である。工作機械の機械構造には、機械周辺の温度変化や機械要素からの発熱によって温度変化と熱変形が起こる。この熱変形は、安定した加工精度を阻害する代表的な要因とされている。工作機械の熱変形に対しては、様々な対策が提案されている。工作機械周辺の温度管理を実施し、機械内部の熱源の影響の排除や温度管理を実施することが根本的な対策といえるが、工場環境や様々な設計制約の中では容易でないことも多い。そこで、発生した熱変位を推定し、それらを打ち消すように CNC 装置による指令位置を制御することで、加工対象物の精度劣化を抑制する手法が、これまでに非常に多く研究され、市販機に搭載されたものも多い。本研究では、ターニングセンタの熱変位について、機械構造に取り付けた温度センサの値から、深層学習による熱変位推定モデルで熱変位を推定し、CNC 装置で補正制御する手法について提案した。

熱変位補正のための温度センサを工作機械に取り付ける場合、温度センサを取り付けた場所の温度変化が、熱変位に与える影響が大きい箇所に取り付けることが望ましい。工作機械構造の熱変位と構造の温度変化の関係は、有限要素法などにより計算することができるが、機械構造全体について、温度変化と熱変位の間関係を一度に可視化することは難しい。そこで、工作機械構造の加工対象物-工具間の相対変位に及ぼす機械構造の温度変化の影響を評価する方法として、「熱感度」を提案した。実際の工作機械構造の熱感度を計算する方法として、有限要素法の計算を利用する方法を示した。

ケーススタディとして、ターニングセンタの熱感度を計算して可視化した。ターニングセンタの熱感度は、ベッド上面の温度上昇で主軸とタレットが離れる方向の変位が生じ、ベッド背面の温度上昇で主軸とタレットが近づく方向の変位が生じることを示す結果であった。次に、熱感度の計算結果と実際の工作機械の主軸-タレット間の相対変位を比較するために実験を実施した。ターニングセンタの周辺温度を変化させた際の機械構造の温度と主軸-タレット間変位を計測した。機械座標系 X 軸方向の熱変位に着目すると、機械の周辺温度の上昇に伴って主軸とタレットが近づく方向へ変位し、その後主軸とタレットが離れる方向へ変化した。この変位は、主軸とタレットが近づく方向に作用する熱感度を持つベッド背面の温度上昇により、まず主軸とタレットが近づく変位が生じ、遅れて離れる方向に作用する熱感度を持つベッド上面の温度上昇により変位の緩和と変位方向の反転が発生するメカニズムである。温度変化、変位の関係と熱感度から、ターニングセンタの環境温度変化に対する変形メカニズムを説明することができた。

さらに、機械周辺の温度変化に対する熱変位を抑制する目的で、熱感度の計算ケーススタディを実施したターニングセンタに対してカバーとファンを取り付け、機械構造の温度分布を最適化する実験を実施

した。温度変化の早いベッド背面は、空気との熱交換を阻害するカバーを取り付け、温度変化の遅いベッド上面は、空気との熱交換を促進するファンを取り付けた。カバーとファンの取り付けによって機械座標系 X 軸方向の熱変位を抑制することができた。熱感度の計算結果と熱変位の計測結果に基づいて、熱変位へ影響を与える機械構造の部位を特定し、対策を施すことで熱変位が抑制できる結果を得た。

本論文の第 3 章以降では、ターニングセンタの熱変位を推定するための、深層学習を用いた熱変位推定モデルの構築と、それを用いた熱変位補正に関して、新しい提案を行った。工作機械の熱変位推定のために、従来の研究で多く用いられてきた数式によるモデル化手法は、次数、静的・動的、線形・非線形など、設計者が対象に合わせて選択しなければならない要素が多い。そのような必要性が少なく、性能の良いモデル化手法として深層学習が挙げられる。そこで、CNN を用いた熱変位推定モデルを提案した。

深層学習では、多くのデータで学習すると精度が向上することが知られている。工作機械の熱変位推定モデルを学習するために、多数のターニングセンタの熱変位を測定する方法を示した。熱変位データとして、工作機械の機械構造に取り付けた温度センサと、主軸-タレット間の相対変位を非接触変位センサを用いて測定した。熱変位に影響する要因として、(1) クーラントの温度上昇、(2) 主軸運転、(3) 軸稼働、(4) 環境温度変化、の 4 つを挙げ、それぞれが熱変位に及ぼす影響を測定できるように測定条件を設定して熱変位データの収集方法を述べた。

深層学習による熱変位推定モデル学習のケーススタディとして、6 台の同一機種 of ターニングセンタについて、環境温度変化条件の熱変位データを収集し、提案した CNN による深層学習によって熱変位推定モデルを学習した。学習した熱変位推定モデルの誤差は、0.01 mm 程度以下であり、熱変位を高精度に推定することができた。また、L2 正則化による重回帰分析（リッジ回帰）による熱変位推定モデルと、提案した CNN による熱変位推定モデルの推定性能を比較し、CNN の方が良好な結果であった。工作機械の熱変位推定や補正制御において、熱変位推定モデルや推定値の信頼性は非常に重要である。信頼性が低いと、本来適用されるべき補正量が適用されず、加工対象物の品質低下の原因になるばかりでなく、過大な補正量が適用されて機械の故障の原因になることも考えられる。そこで、「Bayesian dropout」を用いて熱変位推定モデルや推定値の信頼性を推定分布として計算する方法を提案した。

信頼性計算のケーススタディとして、6 台の同一機種 of ターニングセンタの、クーラント温度上昇、主軸運転、軸稼働、環境温度変化の各条件の熱変位データを収集し、3 台の機械のデータで CNN による熱変位推定モデルを学習した。学習データと、学習には使用しなかった評価用の 3 台の機械のデータで、熱変位の推定値と推定分布を計算した。学習データと評価データで、熱変位の推定精度と推定分布に大きな差はなく、熱変位推定モデルは、評価用データに対しても、十分な推定精度を示した。

熱変位推定モデルや推定値の信頼性を低下させる条件として、入力データである温度センサの故障を想定したシミュレーションを実施した。温度センサの種類として抵抗出力式と電圧出力式について、断線と接触不良の故障形態を仮定した。学習した熱変位推定モデルへ、温度センサの故障シミュレーション信号を入力し、推定精度と推定分布の変化を調べた。故障によって熱変位推定モデルへ入力される値の変化が相対的に大きくなる抵抗式温度センサの故障条件では、熱変位の推定誤差と推定分布が共に大きくなった。さらに、抵抗式温度センサの接触不良を考慮した条件では、熱変位の推定値と推定分布の時間変動も大きくなる結果であった。

計算した推定分布が大きい場合に、工作機械の熱変位制御に使用する補正量が大きく変動したり、過大な補正量が適用されることがないようにするために、熱変位推定モデルと工作機械の CNC 装置の間に移

動平均フィルタを追加して補正量を修正する手法を提案した。移動平均フィルタは、推定分布の計算結果に応じて平均長を変更した。推定分布が大きい場合は平均長を大きくとって変動の影響が少なくなるようにし、分布が小さい場合は小さい平均長で推定値をそのまま採用するようにした。温度センサの故障シミュレーション信号を入力した場合、熱変位推定結果への影響が大きかった抵抗出力式温度センサの故障条件の場合には、補正量の修正が強く働いて異常な補正值が適用されることを防ぎ、熱変位推定結果への影響が小さかった電圧出力式温度センサの故障条件の場合には、補正量はほとんど修正されずに高精度な補正值を維持することができた。

提案した熱変位推定モデルによる推定分布の計算機能と、推定分布の計算結果を使用した補正量の修正アルゴリズムを、熱変位推定モデルの学習用に熱変位データを収集したターニングセンタと同一種類の機械に搭載し、切削試験で効果を確かめた。主軸運転条件と軸稼働条件を組み合わせた状態で切削試験を実施し、補正制御をしない場合の外径変化が 0.031 mm であったのに対し、提案手法で補正制御を実施した場合は 0.018 mm の外径変化であった。切削試験に使用した機械は、学習用の熱変位データを取得した機械ではないが、熱変位を抑制できる結果となり、推定分布の計算による信頼性評価と補正量の修正アルゴリズムで実際に加工対象物の加工精度を向上できることを確認できた。

深層学習による工作機械の熱変位推定において、熱変位推定モデルや推定値の信頼性に影響を与える代表的な要素として、センサの故障により生じる入力データの外乱が挙げられる。そこで、深層学習による熱変位推定モデルを学習する際に、あらかじめ想定できる温度センサの故障状態に基づいてシミュレーションした、温度センサの故障信号を正常信号と混合して学習することで、温度センサの故障に対してロバストな熱変位推定モデルが学習できる方法を提案した。

温度センサ故障を考慮した学習のケーススタディとして、CNN による熱変位推定モデルで温度センサの接触不良と断線を故障状態として考慮した学習を実施した。故障状態を考慮した学習によって、熱変位推定結果に生じる変動を抑制できることを示した。あらかじめ想定できる温度センサの故障パターンについて、故障により生じる外乱に対してロバストな熱変位推定モデルを構築することができた。