

マシニングセンタ向けリアルタイム熱変位補正システムの開発*¹

Development of Real-Time Thermal Displacement Compensation System for Machining Centers

岩井英樹 H. IWAI 佐々木雄二 Y. SASAKI 若園賀生 Y. WAKAZONO
桜井康匡 Y. SAKURAI 岡 祐司 Y. OKA

The thermal displacement of machine tools due to environmental temperature change causes machining errors. To compensate thermal displacement, we have developed a fast and accurate method for estimating thermal displacement based on FEM using the temperature obtained by the sensors attached to the machine tool. Machining errors due to the thermal displacement on horizontal machining centers equipped with this system were able to be reduced by 80% or more in an environment where the room temperature varies by 20°C.

Key Words: machine tool, thermal displacement, displacement compensation, real-time, FEM

1. はじめに

近年の製造業では、生産拠点のグローバル化にともない、世界中のどこでも同一品質を得られる生産技術が求められている。安定した加工品質を妨げる大きな要因の一つに加工機の熱変位がある。マシニングセンタをはじめとする工作機械は、設置環境の室温が変化すると機械構造体が熱変形する。その結果、工具と工作物の相対位置が変化して加工精度が悪化する。熱変位による加工精度の悪化を防ぐには、工作機械を恒温室に設置したり、冷却油などで機械構造体の温度分布を一定にしたり、構造体そのものを低熱膨張材で製作するといった方策がある。これらの熱変位を抑制するための方策は、いずれも製造コストやランニングコストの上昇を招き、省エネルギーの観点からも得策ではない。

一方で、ある程度の熱変位を許容し、それをNC制御で補正することにより加工精度を確保する方策がある。これには加工点の熱変位量の把握が必要であり、実測による方法¹⁾と推定による方法に分けられる。熱変位量の把握方法を図1にまとめる。加工中に熱変位を安定して測定し続けることは困難なため、熱変位を実測することは現実的とはいえない。熱変位を推定するには、通常はセンサの追加が必要となるものの、主にソフトウェアにより熱変位推定機能を実装することが可能となる。そ

のため、加工点の熱変位推定に基づく熱変位補正手法は、熱変位抑制手法に比べて製造コストやランニングコストの増大を抑えることができ、望ましい手法といえる。

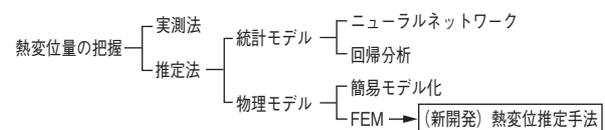


図1 熱変位量の把握方法

Acquisition method of thermal displacement

熱変位を推定する方法としては、統計モデルによる方法と物理モデルによる方法とに分けられる。統計モデルは、あらかじめ採取した温度データと変位データから、ニューラルネットワークや回帰分析といった方法によりモデルを構築して熱変位を推定する方法が代表的である^{2)~5)}。物理モデルにより熱変位を推定する方法としては、機械構造体を簡易モデル化して解析的に熱変位を推定する方法⁶⁾がある。これらの方法はいずれも特定の条件や環境に対しては精度良く熱変位推定ができるものの、どのような状況であっても精度良い熱変位推定が期待できるとは限らない。

物理モデルにより熱変位を推定する他の方法としては有限要素法 (Finite Element Method: FEM) を使用して、工作機械の周囲温度を実測し熱解析により機械構造体の温度分布を求めて変形解析を実施する方法⁷⁾や機械構造体の実測した代表点の温度から内挿して温度分布を求めて変形解析を実施する方法⁸⁾などが提案され

* 1 本論文は、精密工学会誌 第83巻第2号 (2017年) 121-124を基に作成した。

ているが、熱解析の条件設定の難しさや FEM の多大な計算量から実用には至っていない。

そこで筆者らは FEM をベースとしながらも工作機械の CNC に搭載してリアルタイムに熱変位補正が可能となる熱変位推定手法を考案し、リアルタイム熱変位補正システムを構築した。開発したシステムを搭載した横形マシニングセンタを環境試験室に設置し、室温が 20℃ 変化する条件で加工評価をおこなった。その結果、開発システムにより Z 方向の加工誤差を 80% 以上低減することができた。

2. 熱変位推定手法

一般的に、工作機械の機械構造体は複雑な形状をしているため、FEM による変形解析で精度良く熱変位を求めるには FEM モデルに多くの節点が必要となり、解析時間も長くなってしまふ。一方、時々刻々と変化していく室温に追従して変化する工具と工作物の相対変位を補償するために、ある時間間隔で補正值を更新していく必要がある。そのため、多くの節点を擁する FEM モデルであっても短時間で熱変位演算を終えなければならない。また、周囲温度から熱解析により機械構造体の温度分布を求めることは困難であるが、機械構造体の実測温度を使用するには FEM モデルの全節点の温度を測定する必要があり、現実的には不可能である。さらに、限られた記憶容量の CNC に搭載するためコンパクトにしなければならない。そこで、これらの課題を解決するために以下の二つの方策を考案した。

2.1 領域内温度均一化による実測温度を用いた推定手法

前述のとおり、FEM を用いて構造体の熱変形を演算するには、数万～数十万点のモデル節点に対し、同数の温度情報が必要となるが、実機で数万個の温度センサを用いて温度を計測することは、現実的には不可能である。したがって、限られたセンサ数でも加工機全体の熱変形を演算できる技術が求められる。

そこで、構造体を熱特性を考慮した複数の領域に分割し、各領域内の節点温度を均一として扱う解析手法を考案した。各領域の節点温度は温度センサによる実測温度を基に設定する。領域分割と温度センサの配置は非定常熱解析の結果を参照して決定する。図2に横形マシニングセンタのコラムの簡略化モデルを例として本手法の基本的な考え方を示す。

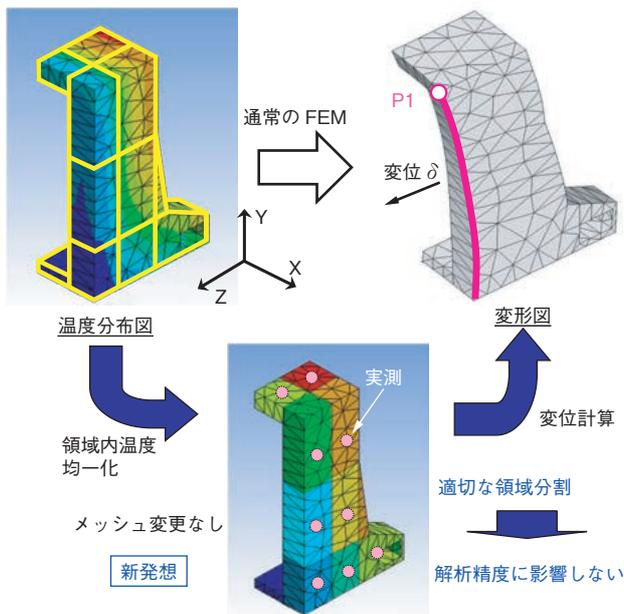


図2 熱変位推定ロジックの基本的な考え方
Basic concept of thermal displacement estimation logic

図3は、図2のマシニングセンタのコラム簡略化モデルの雰囲気温度が4時間で8℃変化するという条件下にて、通常非定常熱解析にて得られた温度分布で変形解析した結果と、新開発の領域内温度を均一化して演算した結果のうち、図2中の点P1のZ方向変位で比較したグラフである。熱変形が最大となる4時間経過時の各点の熱変位量の比較でも、ほとんど差がないことが分かる。また、データは割愛するが、全時間において±1μmの差異にて演算できることを確認した。

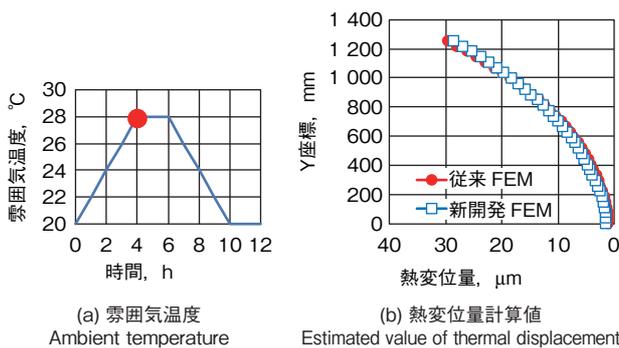


図3 熱変位演算値の比較
Comparison of thermal displacement estimated values

このように、実際の温度分布は複雑であるが、推定精度を維持するため適切な最小限の領域分割とセンサ配置を求めた結果、大幅に温度分布を簡素化しても推定精度が維持できることが分かった。

本手法は、限られた実測温度を使用しながらも精度良く熱変位推定が可能となるだけでなく、次節にて説明す

るとおり、熱変位演算に用いるデータ容量、演算時間を大幅に削減することができる。

2.2 高速高精度熱変位演算プログラム

時々刻々と変化する工作機械の熱変位を、マシニングセンタの CNC で演算し、リアルタイムで補正するには、前述の演算精度を維持しつつ、演算に用いるデータ容量、演算時間を大幅に削減する技術も必要である。

構造解析などで FEM を活用する場合、得られた結果を基に、モデルの形状などを修正し、再度解析をしながら、満足する性能が得られるまで繰り返している。そのため、大規模な計算となる剛性マトリックスの逆行列は求めず、連立一次方程式としてガウスの消去法などにより各節点の変位量を求めることが一般的である。

これに対し、熱変形解析に特化して連続で高速演算するため、以下に示す新しい手法を開発した。

図4に、節点数約2万点（約6万自由度）、領域分割数26のFEMモデルを例に具体的な演算手法を示す。

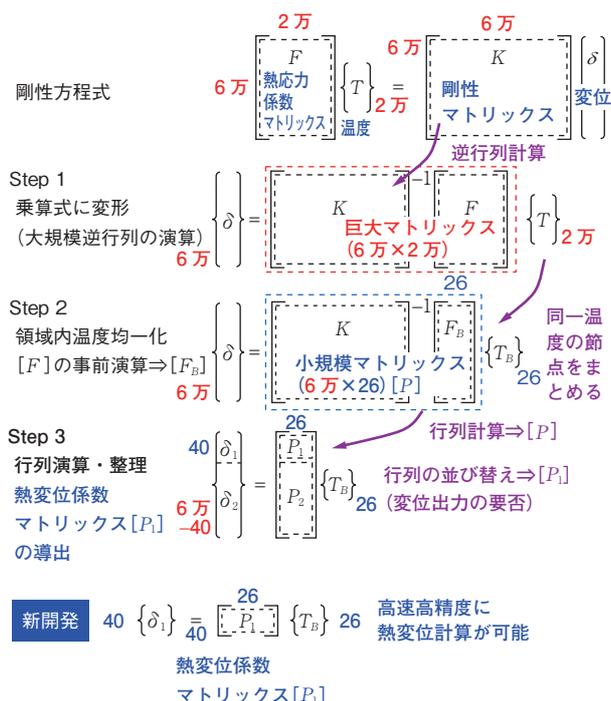


図4 高速演算を実現する手法

Developed method for enabling high-speed calculation

【Step 1】

FEMによる変形解析では、次式の剛性方程式を解くことによって節点変位が求められる。

$$\{f\} = [K] \{\delta\} \quad (1)$$

ただし、{f} は外力ベクトル、[K] は剛性マトリックス、{δ} は節点変位ベクトルである。節点温度変化による熱応力以外の外力は考慮しないので、外力ベクトル {f} は熱応力係数マトリックス [F] と節点温度ベクトル {T} の積となり、式(1)は次式のように表される。

$$[F] \{T\} = [K] \{\delta\} \quad (2)$$

熱変位補正システムでの熱変位量の演算では、機械構造は変わらないため、同じFEMモデルを用いて演算を繰り返すことになる。そこで、構造体の形状と材料のみで決まる剛性マトリックス [K] およびその逆行列 $[K]^{-1}$ 、熱応力係数マトリックス [F] をあらかじめ計算しておくことができ、式(2)は次式のように表される。

$$\{\delta\} = [K]^{-1} [F] \{T\} \quad (3)$$

式(3)を使用して実測温度から変位を求める方法としては、先行研究^{9) 10)}があるが、本研究ではFEMモデルの節点数よりはるかに少ない数の温度測定点であっても以下のStep 2, 3により熱変位を求めることを実現している。

【Step 2】

分割した領域内の節点温度を均一としたので、節点温度ベクトル {T} に代えて領域温度ベクトル {T_B} を導入する。これにより、熱応力係数マトリックス [F] の成分のうち、同一領域内の節点に対応する成分をまとめることができる。その結果、熱応力係数マトリックス [F] は列数が領域数と同じ行列 [F_B] となり、式(3)は次式で表される。

$$\{\delta\} = [K]^{-1} [F_B] \{T_B\} \quad (4)$$

この例では、{T_B} の成分数、[F_B] の列数はともに26である。熱変位係数マトリックス [P] を、

$$[P] = [K]^{-1} [F_B] \quad (5)$$

とすれば、式(4)は次式のように表される。

$$\{\delta\} = [P] \{T_B\} \quad (6)$$

【Step 3】

式(6)によれば、節点変位は熱変位係数マトリックス [P] と領域温度ベクトル {T_B} の乗算で求められる。式(6)では全節点の X, Y, Z 方向の変位量が得られるが、加工点の熱変位量を推定するのに必要な節点変位はごく一部である。そこで、必要な節点変位を {δ₁}、必要で

はない節点変位を $\{\delta_j\}$ として式(6)の成分をソートすると、次式のように表される。

$$\begin{Bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \end{bmatrix} \{T_B\} \quad (7)$$

この式から、必要な節点変位に関する成分を取り出すと、

$$\{\delta_j\} = [P_j] \{T_B\} \quad (8)$$

となる。この例では、熱変位係数マトリックス $[P_j]$ は 40×26 のコンパクトなマトリックスであり、領域温度ベクトル $\{T_B\}$ は 26 成分であるので、加工点熱変位を推定するのに必要な節点変位 $\{\delta_j\}$ は非常に少ない計算量で式(8)より求められる。

本手法によると、**図5**に示すように、大規模なモデルを用いているにもかかわらず、温度変化と熱変位の関係を事前に計算しておくことができるため、従来のFEMでは高性能PCでも数分必要とする演算を、CNC内で行うことができる。

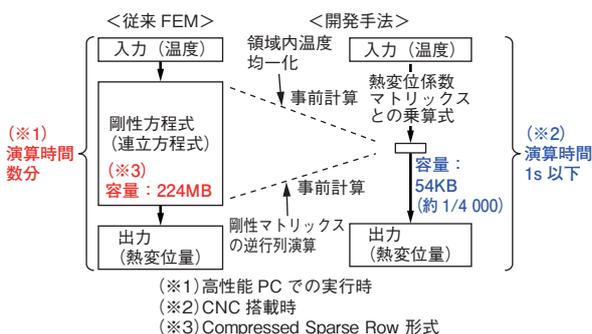


図5 従来FEMとの比較

Comparison between developed method and conventional FEM

3. 実験検証

3.1 実機搭載

リアルタイム熱変位補正システムの構成を**図6**に示す。

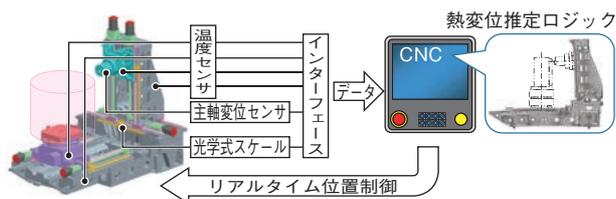


図6 リアルタイム熱変位補正システム

Real-Time thermal displacement compensation system

機械各部に設置した温度センサで計測した温度データと機械のFEMモデルを基に、CNC内で熱変位量を演算し、軸移動空間内の各座標について工具と工作物の相対熱変位を算出する。これを、直線軸の静的な空間誤差として軸移動量を補正する。補正量は一定時間間隔で更新していく。

開発したリアルタイム熱変位補正システムを、FH630SX-i 横形マシニングセンタに搭載した¹¹⁾。

3.2 加工評価

開発システムを搭載したFH630SX-iを環境試験室に設置し、加工による評価をおこなった。国内の一般的な工場環境は、1日の温度変化が5℃～10℃であるが、気温の変化が大きい海外工場での過酷な環境を想定し、**図7**に示す4時間で室温が20℃変化する厳しい温度パターンで評価した。加工評価方法は、以下の通りである。

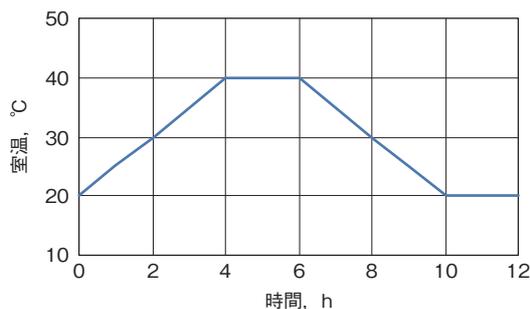


図7 加工評価時の室温変化パターン

Temperature change during machining evaluation

X, Y方向については室温変化開始時点を時刻0として2時間おきにテストピースにφ8の穴をコンタリング加工した。加工完了後、室温が20℃になって十分安定してから、3次元測定機にてテストピースの加工した穴中心位置を測定し、時刻0に加工した穴中心位置との差を各時刻のX, Y方向の熱変位による加工誤差とした。

Z方向は室温変化開始時点を時刻0として1時間おきにY方向に平面加工をおこなった。加工完了後、室温が20℃になって十分安定してから、主軸を走査して主軸端に取り付けた非接触変位計にて加工面のZ方向高さを測定し、時刻0に加工した面高さとの差を各時刻のZ方向の熱変位による加工誤差とした。

図8に、リアルタイム熱変位補正無し/有りの条件にて実際に加工したX, Y, Z各方向の加工誤差を示す。X, Y, Z全方向での加工誤差を、補正がない場合の最大65μmに対して8.5μm以下に抑えることができている。

20℃ という大きな室温変化に対しても、安定した加工精度が得られていることが分かる。

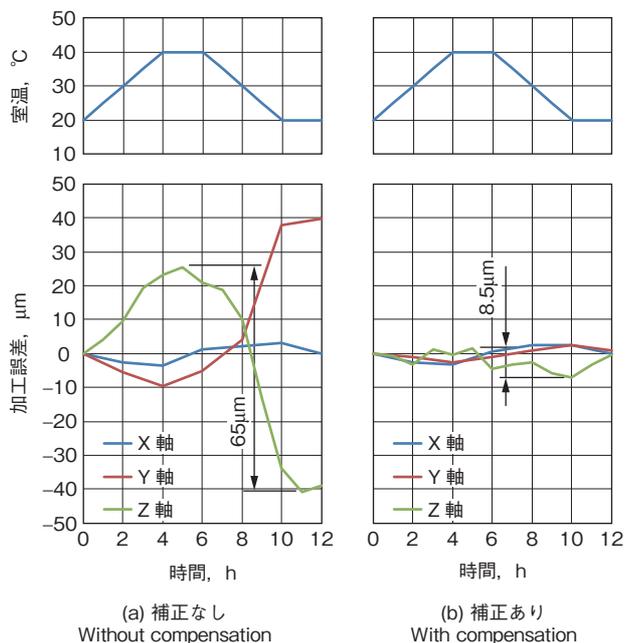


図8 加工誤差の比較
Comparison of machining errors

4. おわりに

FEM をベースとした手法でありながら CNC に搭載して高速で変位演算が可能となる熱変位推定手法を考案し、この手法を組み込んだリアルタイム熱変位補正システムを開発した。本システムを搭載した FH630SX-i 横形マシニングセンタを環境試験室に設置し、室温が4時間で20℃変化するという条件下で加工評価を実施した。その結果、室温が変化する中でも安定した加工精度が得られることを確認した。

今後は、順次他機種に本システムを搭載していく予定である。

参考文献

- 1) 幸田盛堂, 石橋幸治, 北垣和浩, 奥田長三, 村田悌二: レーザ反射光点変位検出による工作機械熱変位の計測と制御, 精密工学会秋季大会講演論文集, (1986)581.
- 2) 森脇俊道, 社本英二, 河野昌弘: ニューラルネットワークによる工作機械の熱変形予測, 日本機械学会論文集, 61, 584(1995)1691.
- 3) 森脇俊道, 趙 成和: ニューラルネットワークによるマシニングセンタの熱変形予測, 日本機械学会論文集, 58, 550(1992)1932.

- 4) 影山雄介, 于 強: 階層的クラスタリングに基づく応答曲面法, 日本機械学会論文集(A編), 70, 695(2004)953.
- 5) 佐藤礼士, 千田治光: 工作機械の高精度な熱変位補償システム, 検査技術, 9, 2(2004)17.
- 6) 西脇信彦, 堀 三計, 堤 正臣, 国枝正典: 工作機械の設置環境とコラムの熱変形挙動, 日本機械学会論文集, 53, 495(1987)2408.
- 7) 森脇俊道, 趙 成和, 西内元信: 環境温度変化によるマシニングセンタの熱変形, 日本機械学会論文集, 57, 539(1991)2447.
- 8) 松尾光恭, 安井武司, 稲村豊四郎: マシニングセンタの温度分布測定による熱変位補正, 精密工学会誌, 57, 3, (1991)550.
- 9) 竹内芳美, 大久保信行, 佐田登志夫: 温度分布測定による工作機械構造の実時間熱変形制御, 精密機械, 42, 503(1976)1043.
- 10) 竹内芳美, 佐田登志夫, 佐藤 真, 鈴木博一: 計算機補正による数値制御工作機械の加工精度の向上(第2報), 精密機械, 46, 12(1980)1532.
- 11) 岡 祐司, 津坂浩行: JTEKT ENGINEERING JOURNAL, No. 1012(2014)70.

筆者



岩井英樹*
H. IWAI



佐々木雄二*
Y. SASAKI



若園賀生**
Y. WAKAZONO



桜井康匡*
Y. SAKURAI



岡 祐司***
Y. OKA

* 研究開発本部 加工技術研究部

** 博士(工学) 研究開発本部 加工技術研究部

*** 工作機械・メカトロ事業本部 工作機械開発部