研究

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)*

——環境温度変化に対する誤差補正——

竹内芳美** 佐田登志夫*** 佐藤 真† 鈴木博一†

Improvement of Working Accuracy of a
Numerically Controlled Machine Tool
by Computer Control Compensation
(2nd Report)

—Error Compensation for the Ambient
Temperature Change—

Yoshimi TAKEUCHI, Toshio SATA,
Makoto SATO and Hiroichi SUZUKI

The study presents the improvement of the working accuracy by removing the error for an ambient temperature change, which affects the working accuracy largely. A machining center is newly developed, where various kinds of remedies are considered against the thermal deformation from

the design stage. Further, in order to maintain the accuracy of the machine under more severe environment, a program is made to estimate the error due to the ambient temperature change and to modify numerical control commands. The error is decided from the temperature distribution on the machine and is replaced to the displacement of the spindle. The possibility of the error compensation for the ambient temperature change is confirmed by boring- and endmilling experiments, together with the geometrical error compensation.

Key words: improvement, working accuracy, ambient temperature change, machining center, thermal deformation, compensation program, numerical control command.

1. 序 論

工作機械に内在する幾何誤差（位置決め誤差や送り軸の真直度、各軸の直交度などが総合された誤差）と変形誤差（切削力や発熱、あるいは温度変化による機械・工具・工作物などの変形による誤差）を計算機に予測させ数値制御命令を修正することにより高精度の加工システムを実現することがこの研究の目的である。

前報では、誤差を加工空間内の誤差ベクトルとして表現し、その一般的な補正方法を考察し工作機械自体の持つ幾何誤差を補正し加工精度を向上させた例について述べた¹⁾。本論文では加工精度低下の大きな原因となっているもう一つの誤差である変形誤差に関して、そのうちでも特に環境温度が変化した場合の機械構造の変形による加工精度の低下を補正した例について報告する。

この研究用に試作されたマシニングセンタ P 06 は熱変形対策として様々な防止装置を備えており、高精度加

工を行うという目的を遂行するため空調された部屋に設置されることを前提としている。そのため通常の機械加工現場に比べ、設置される環境は厳しく管理され、その設備は高価なものになっている。このような工作機械が環境を特に選定しなくても稼働できれば省エネルギーという点からも非常に有利になる。以下ではまず機械設計段階からの熱変形対策について簡単に説明し、次に上述の観点から研究された環境温度の変化に伴う機械構造の変形に対する補正方法とそれに基づく実験と結果について述べる。

2. マシニングセンタの熱対策

試作されたマシニングセンタ P 06 は、高精度加工システムとしてその機能を果たすため、設計時から変形誤差に関しては多くの考慮が払われている。切削加工では切削に伴う発熱の大部分は切りくずに伝わるので速やかに切りくずを排除することが望ましく、このことから基本構造としてテーブルから工作物をつり下げ、切りくずを重力によって下方に落とすという通常とは逆の発想で工作物をすえつけることが考案された。また落下した切りくずが速やかに機械外へ運び出されるようにベルトコンベアが取付けられている。

工作物がつり下げられるという構造のため工作物やテ

* 原稿受付 昭和55年1月21日、3rd I.C.P.E. (昭和52年7月15日) および 精機学会九州支部久留米地方講演会 (昭和52年11月21日) にて発表。

** 正会員 九州工業大学 (北九州市戸畑区仙水町1)

*** 正会員 東京大学工学部 (東京都文京区本郷7-3-1)

† 正会員 (株) 牧野フライス製作所 (東京都目黒区中根2-3-19)

図1 高精度加工システム (マシニングセンタ P06) の基本構造

ープルの自重が側壁に直接かかるので高い剛性が要求される。また熱変形に対して複雑な変形を避けるということも考えあわせて構造は対称にされ、結果として箱型となっている。基本設計として図1に示されるような箱型対称の鋼板溶接による二重壁構造が計画された。基本構造のサイズは、予想される工作物の大きさや加工範囲から定められ、各部材の寸法は加えられる負荷に対し変位が許容される範囲に入るよう決定される。計算には既に報告した剛性解析システム²⁾³⁾が用いられた。

切削によって発生した熱は、切りくずだけでなく工具や工作物にも伝わる。工具の熱膨張や工作物の熱変形を防止するためこの機械が箱型の密閉構造であることを利用して、加工空間内に温度を室温と同じにコントロールされた大量の水性流体を四方八方から散布する。流体は発生した熱を吸収するだけでなく、切りくずを機械外へ押し流す役目も果たす。流体は切りくずを除いたあと再度、循環使用される。図2に主軸付近に水性流体がかけられている様子を示す。

機械を稼働させると、各所で摩擦熱などによる発熱があるが、特にボールねじ部で大きく、

図2 加工時の発熱を抑制するために主軸付近にかけられるシャワー

正確な送りが妨げられる。このため各軸のボールねじ部に温度検出器を配置し、温度上昇に見合うだけのコントロールされた油性の流体を冷却のために循環させている。これらの熱に対する対策を全体のシステムとあわせて図3に示す。

高精度加工システムとしてのマシニングセンタ P06の全景を図4に示す。図中、左方に置かれているテレビジョンは、箱型構造であるため外部から見ることでない内部の加工状況をモニターするためのものである。

3. 環境温度変化による加工誤差の補正

3.1 環境温度の影響とその対応策

様々な熱対策を施されたこのマシニングセンタは、一定の温度に管理された恒温室では極めて高い加工精度が得られる。しかし、温度の変動幅を小さく、かつ一様に保持しようとすればするほど維持費がかさむことになる。また試験的にではなく、実際に工場で使用することを考えると、一般に加工現場が空調されていることはまれであり、恒温室のような良好な状態にあるとは言えない。

図3 温度管理を含めたシステム全体のブロック図

図4 マシニングセンタ P06の全景

い。機械は、1日の周期で変わる温度の変化、季節ごとの変動、さらには窓などから入射する陽光や隣接する機械からの輻射熱など機械構造の温度分布を変える多数の要因に囲まれている。このような環境の中でも高精度の加工システムとしての機能を発揮させるには、環境温度の変化に対する機械への影響を熟考し、その対策法を確立しなければならない。

機械構造の熱変形は、時々刻々と変化する構造の温度分布から決まるので常時、構造の温度分布を測定する必要がある。前報で述べたように主軸方向(z 軸)には位置を動かさないで、主軸に垂直な面内での誤差を補正するということから構造の熱変形が主軸をガイドする部分にどのような影響を与えるかを知ればよい。構造の温度分布から変形量を具体的に知るには、有限要素法を利用してあらかじめ作成しておいた温度と変位の関係を表すマトリクスを利用し温度分布ベクトルとの積を作ればよい。両側ガイド部の熱変位が求まると、主軸の置かれている位置に応じてその熱変位量を振り分けることができ、主軸の置かれている位置での誤差がわかる。ただし、両ガイド部を動くクロスメンバーには環境温度の影響は及ばないと仮定する。誤差が推定できればそのときの数値指令値を修正することにより誤差を補正できる。この方針に基づき、次に補正方法を述べる。

3.2 補正方法

環境温度の変化に対するマシニングセンタの主軸の数値指令値からのずれは、次のようにして求めることができる。まず機械本体に取付けられた多数の温度センサの定常な室温からの上昇/降下値 $\{\theta\}$ から主軸をガイドする部分の x, y 方向の変位 $\{D_x\}, \{D_y\}$ を計算する。このとき機械に取付ける温度センサの数と取付位置は、変位を計算するために機械構造を有限要素に分割したその要素の数だけ準備し、各要素の中心に当たる位置に配置するのが理想であるが、実際にはセンサの数に限度があるので、構造が温度変化の影響を受けやすい要素を選んで適宜配置する。ここでは後に示すように主軸ガイド部近くの側壁に10か所配した。

測定温度 $\{\theta\}$ からガイド部での熱変位を求めるには、温度上昇によって生じた熱ひずみを等価な外力と置き換え、剛性マトリクスの逆行列を乗ずる⁴⁾が、この操作をマトリクス $[A]$ で代表させると、たとえば x 方向に関しては次のようになる。

$$\{D_x\} = [A_x] \{\theta\} \quad (1)$$

ここで、ベクトル $\{D_x\}$ は、ガイド部各点の x 方向の変位を並べたものである。 y 方向についても同様に

$$\{D_y\} = [A_y] \{\theta\} \quad (2)$$

マシニングセンタの構造からわかるように、主軸は両ガイドによって張られる $x-y$ 面内を指令に従って動く。そこで環境温度の変化によって変形する機械構造が主軸に与える影響を予測しなければならない。主軸の位置は指令とともに変化してゆくため、式(1),(2)で得られた熱変位量から主軸位置 (x, y) での変位 (dx, dy) を次のように補間する。

$$\left. \begin{aligned} dx &= c_1 + c_2x + c_3y + c_4xy \\ dy &= c_5 + c_6x + c_7y + c_8xy \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

平面内で他の変位成分、たとえば x 軸、 y 軸まわりの回転誤差を考へないのは、このマシニングセンタが回転補正機能を有していないからである。また、テーブルが動きながら加工が行われるというような z 軸方向の動きに関して考へないのは前報で述べたように加工空間内の任意の位置での誤差を表現する誤差関数の作成に測定上の困難があるために面内の加工に限定しているからである。

式(3)の補間のための係数 $c_1 \sim c_4$, $c_5 \sim c_8$ は、前報と同様に最小自乗法を用いて次のように決めることができる。

$$\left. \begin{aligned} \begin{Bmatrix} c_1 \\ \vdots \\ c_4 \end{Bmatrix} &= G \cdot (G^T \cdot G)^{-1} \cdot [A_x]^T \{\theta\} \\ \begin{Bmatrix} c_5 \\ \vdots \\ c_8 \end{Bmatrix} &= G \cdot (G^T \cdot G)^{-1} \cdot [A_y]^T \{\theta\} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

ここで、 T は行列の転置を、 -1 は逆行列を意味する。また

$$G = \begin{Bmatrix} 1 & x_1 & y_1 & x_1y_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_i & y_i & x_iy_i \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_n & y_n & x_ny_n \end{Bmatrix}$$

式(4)から想像されるように、温度分布 $\{\theta\}$ が測定できると係数 $c_1 \sim c_4$, $c_5 \sim c_8$ が求まり、さらに式(3)に主軸の位置を代入すればその位置での変位が定まる。この情報を補正プログラムに入れば幾何誤差とともに環境温度変化による誤差を取り除くことができる。

3.3 補正プログラム

補正プログラムの大まかなフローチャートを図5に示す。入力されるデータとしては、幾何誤差補正か、あるいは環境温度変化による誤差補正までかを、また加工のタイプとしては穴あけか輪郭加工かを、さらに許容される誤差範囲をキーインする。続いて主軸の位置の読込みでは、穴あけなどポイントを指定すればよいものはその

座標値だけで済むが、輪郭加工の場合には工具経路をいくつか分割してその位置を与える。主軸位置がわかれば、幾何誤差は誤差関数により直ちに計算できる。環境温度変化による誤差が必要な場合には、そのときの温度変化が入力される。誤差が求められるとそれに基づいて補正された新しい座標値が決まる。数値制御命令が終了するまでこの操作が反復行われる。

幾何誤差の補正は加工に先立って行うことができるが、時々刻々変化する環境温度変化による誤差に対しては必然的にオンライン制御にならざるを得ない。この補正プログラムでは温度変化分をマニュアルでインプットしており、補正の実用化には加工中に温度変化を測定し、同時に数値制御命令を修正する技法が必要になる。

4. 実験方法と実験結果

4.1 実験方法

実験は前報と同様な方法で行う。すなわち、基板となる鋼板上に100 mm角の铸铁ブロックを9個、150 mmの間隔で格子状に固定したものを中ぐり・エンドミル加工する。環境温度変化による誤差を補正することから、環境温度を室温(20℃)から35℃まで上げながら加工を行う。

補正プログラムは、温度変化をオンラインで測定し、数値制御命令を自動的に修正するには作られていないので、あらかじめ室温を20℃から35℃まで上昇させ

図6 マシニングセンタの有限要素分割

図7 環境温度の変化とそれに伴う機械構造の温度上昇

ながらマシニングセンタの各所に取付けられたサーミスタ温度計の温度を記録し、マニュアルで補正プログラムに入力し、オンラインと同じ状況下にあるようにしている。プログラムの出力として補正情報を含む新しい数値制御テープが得られる。このテープと補正されていないテープを用いて加工を行い、その結果を比較する。

ここで、温度から主軸の変位を計算するためにマシニングセンタに取付けられたサーミスタ温度計の位置と有限要素に分割された様子を図6に示す。黒丸で示される点は、主軸ガイドの変位から主軸の変位を求めるために式(4)中のマトリクス G を作るための代表点の位置である。機械構造は、長方形薄板要素36、節点数58で分割されている。

4.2 実験結果

空調装置を35℃に切り換えて環境温度を室温から35℃まで上げたときの室温の変化とそれに伴うマシニングセンタの側面に取付けられたサーミスタ温度計の変化を点5を代表として選び図7に示す。加工は温度上昇開始後30 minから始めて、中ぐり加工・エンドミル加工と45 minかかって終了する。このような変動する環境

図8 中ぐり加工における環境温度変化による誤差の補正

図9 エンドミル加工における環境温度変化による誤差の補正

温度条件下で加工された工作物は恒温室に放置された後、前報と同様な方法で測定する。工作物を取りはずして測定すると機械系の座標と工作物のそれとは相対的な意味しかなくなる。そのため、ある基準点を定め、そこを原点と考える必要がある。

図8に中ぐり加工された工作物の穴の中心位置を5番目の穴を中心として図中に示されたスケールで描いた。黒丸印は補正しない場合、白丸印は補正した場合の結果である。細線は理想位置を示すが、図からわかるように補正された場合の穴の位置はかなり理想位置に近づき、補正の効果が認められる。

エンドミル加工をしたときの輪郭の形状精度を図9に示す。破線は補正しない場合の形状であり、実太線は補正した場合の形状であり、それぞれ細線で示される理想位置からのずれを図中のスケールで描いてある。形状に関しても精度は向上していることが理解できる。

中ぐり加工において理想位置からの距離のrmsを補正なし、幾何誤差だけを補正したもの、幾何誤差+環境温度変化による誤差を補正したものについて計算した結

図10 加工誤差のrms値(中ぐり加工)

果を図10に示す。幾何誤差の補正だけで30%までrmsは低下しており、加工精度はかなり向上し環境温度の影響は少ないように見えるが、これはマシニングセンタが熱変形に対して十分対処するように設計されていることによるもので、一般の場合、環境温度の影響を除くためには本文のような技術が必要であると考えられる。

5. 結 論

加工精度低下の大きな原因となっている熱変形を設計段階から考察し、様々な対策が施されたマシニングセンタを、さらに環境温度変化に対しても加工精度を保持するという観点から研究をすすめ、次のような結論を得た。

- (1) 環境温度変化による機械の変形状態を測定温度から予測し、それを主軸の変位として表現できた。
- (2) 数値制御命令を修正することにより環境温度変化に対する誤差を幾何誤差とともに補正できることをマシニングセンタによる中ぐり・エンドミル加工で確認した。

オンラインで測定した温度を処理し加工時に数値制御命令を変更することが可能になれば通常の数値制御工作機械でさえ厳しい環境条件の下でも精度を保持しながら使用できるであろう。最後に本研究の一部は、昭和52年度文部省科学研究費と通産省補助金の援助のもとに行われたことを付記する。

参 考 文 献

- 1) 佐田登志夫, 竹内芳美, 平元一之, 佐藤 貢, 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1報)——幾何誤差補正, 精密機械, 45, 11 (1979) 1286.
- 2) 佐田登志夫, 大久保信行, 竹内芳美: 工作機械構造の剛性解析システム(第1報)——静剛性および動剛性解析, 精密機械, 42, 10 (1976) 955.
- 3) 竹内芳美, 大久保信行, 佐藤和信, 佐田登志夫: 工作機械構造の剛性解析システム(第2報)——熱剛性解析, 精密機械, 43, 1 (1977) 67.
- 4) 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, 11 (1976) 1043.