バンバン制御による工作機械送りの高精度化に関する研究*

是田規之** 沖友啓成*** 津村憲治*** 竹内克佳*** 江川庸夫†

Study of High Accuracy of Machine Tool with Bang-Bang Control

Noriyuki Koreta, Hironari Okitomo, Kenji Tsumura, Katsuyoshi Takeuchi and Tsuneo Egawa

Application of bang-bang control to reduce the servo error generated by nonlinear elements in numerically controlled machine tools is presented in this paper. It has been proved that the modified inverse transfer function control can eliminate the servo error of numerically controlled machine tools with linear elements but not the servo error with nonlinear elements. The latter servo error can be reduced by the bang-bang control of compensating current for driving motor at start and direction change of the motion. As a result, by providing the machining centers with the control system, the geometrical accuracy of the workpiece at the quadrant corner is reduced from $27\mu\text{m}$ to $14\mu\text{m}$ and that at steep and gentle slope cutting is reduced from $27\mu\text{m}$ to $7\mu\text{m}$ when cutting die weighing 98kN at the feed rate 10m/min.

Key words: bang-bang control, numerically controlled machine tools, modified inverse transfer function control, nonlinear element, geometrical accuracy

1. 緒 言

最近のように、数値制御工作機械の高精度化・高能率化の要求を実現するためには、送りサーボ系をいかに高速にかつ高精度で位置制御を行うかが最大の課題となる。送りサーボ系は、線形要素と非線形要素によって構成されており、サーボ系の位置の誤差は、線形要素によって生じるサーボ誤差と非線形要素によって生じる送りの起動時あるいは方向反転時に発生する過渡的な誤差とからなる。線形要素によるサーボ誤差は修正逆伝達関数補正方式により、理論的に零にすることが可能となり、従来0.5m/min程度の送り速度を10m/minにまで高速化し、かつ $\pm 0.02\text{mm}$ という形状精度が得られるようになってきた¹⁾。ところが、非線形要素による過渡的な誤差は機械系の剛性不足に起因し、機械が大きくなる程その影響は大きく、また理論的に誤差を零にすることは困難である。そこで、従来より、サーボ特性改善のために、機械の駆動系の剛性を向上させて位置ループの利得の向上をはかったり、位置ループへの積分要素の投入、モータ速度制御にモータ速度検出の代わりに機械速度検出を採用するなど、過渡応答を早くする方法が実施されてきたが、いずれもサーボ系全体の安定性に制約され限界があった。バンバン制御は、このような非線形誤差を小さくするのに有効と言われているが^{2) 3)}、数値制御工作機械のサーボ系の非線形要素による追従誤差の改善に関する研究は見当たらない。そこで、本研究では、数値制御工作機械の送り起動時に、機械が動き出すまで電流補正量を印加するバンバン制御をサーボ系の一部に付加し、サーボ系全体としては、一過性の外乱として安定性を保

ち、かつ過渡的な誤差を小さくする方法を考案した。この結果、切削中の象限切換え時誤差とか、急斜面または緩斜面の微小送り切削における食込み誤差など非線形要素にもとづく誤差を著しく改善することができたので、以下本制御法の考え方、シミュレーション結果、門形数値制御工作機械による実験結果について述べる。

2. 従来の送り系の問題点

図1に示す門形の数値制御工作機械の高速・高精度位置決め上の問題点としては、バックラッシュ、ねじれなどの駆動系に関する要因および摩擦など機械支持系に関する要因があるが、一般に中・大形構造のためX、Y軸の送り系の剛性が高くとれず、負荷系の摩擦のため指令トルク発生から摩擦に打ち勝つ負荷トルクの生成までに時間遅れがある。したがって、駆動系が高剛性な場合に比べ摩擦が精度に与える悪影響が大きい。

工作機械の送り系は、モータと負荷を等価な回転系に換算し、それらをばねで連結し、かつ負荷側に支持系の非線形要素であるクーロン摩擦を加えることにより、図2のモデルとなり、運動方程式は

$$\begin{aligned}\dot{\theta}_M &= \omega_M, \quad \dot{\theta}_L = \omega_L \\ J_M \dot{\omega}_M &= \tau^* - D_M \omega_M - K_R(\theta_M - \theta_L) - D_R(\omega_M - \omega_L) \\ J_L \dot{\omega}_L &= -\tau_f - D_L \omega_L + K_R(\theta_M - \theta_L) + D_R(\omega_M - \omega_L)\end{aligned}$$

となる。ここで、 τ^* ：指令トルク、 τ_f ：摩擦トルク、 J_M ：モータ慣性モーメント、 J_L ：負荷慣性モーメント、 D_M ：モータ粘性抵抗、 D_L ：負荷粘性抵抗、 K_R ：ねじり剛性、 D_R ：ねじり粘性、 θ_M ：モータ角度、 θ_L ：負荷角度、 ω_M ：モータ角速度、 ω_L ：負荷角速度とする。今回対象にした数値制御工作機械では、モータ粘性抵抗 D_M 、負荷粘性抵抗 D_L はそれぞれ J_M 、 J_L に比べて小さいので無視する。図2中の破線内は非線形要素を示す。

* 原稿受付 平成5年2月25日

** 正 会 員 菱明技研㈱(広島市西区観音新町4-6-22)

*** 三菱重工業㈱広島工機工場(広島市安佐南区祇園3-2-1)

† 正 会 員 三菱重工業㈱広島研究所(広島市西区観音新町4-6-22)

Fig. 1 Construction of bridge type numerically controlled machine tool

Fig. 2 Model of feed servo system with nonlinear elements

Fig. 3 Block diagram of numerically controlled machine tool applied to bang-bang control

以上より、門形の数値制御工作機械を前報¹⁾で述べた修正逆伝達関数補正制御を行った図3のブロック線図で示すシステムで考えると、破線の枠内に示す非線形要素で発生する過渡的な誤差は、3.1項で説明する一点鎖線で囲んだパンパン制御回路よりの補正電圧 V_F または補正電流 I_F により除かれる。ここで、 θ_N ：指令角度、 K_P ：位置ループ利得、 K_V ：速度ループ利得、 $\frac{1}{G(s)}$ ：修正逆伝達関数で $\frac{1}{G(s)} = 1 + \frac{1}{K_P} s + \frac{J_M}{K_P K_V} s^2$ 、 s ：ラプラス演算子とする。なお、バックラッシュに起因する問題点は、中・大型の工作機械では、低剛性による問題点に比べ、軽微なのでモデルの対象から外す。以上のように、サーボ系に非線形要素があるため、次に述べる問題点1、2が発生する。

問題点1：軸の方向切換え時の応答遅れ

XY平面で円弧移動する場合、例えば図4のR点でX軸が最大速度で動いている時にY軸が方向切換えとなり、反転して、動き出すまで時間がかかるので図に示すひげのような象限切換

Fig. 4 Error due to response delay at direction change of each axis

Fig. 5 Error due to inadequate response balance in moving two axes simultaneously

え時誤差が生じる。ここで、円弧運動における象限切換え時の機械位置と指令位置との差の最大値を象限切換え時最大誤差 E_1 と定義する。

問題点2：2軸起動時の応答バランス不良

例えば、Y軸とZ軸の2軸同時起動においてY軸の応答特性がZ軸の応答特性に比べ、遅い時に発生する。その様子を図5に示す。機械をP点からQ点に移動させる指令軌跡PQにおいて、Z軸の動きに対し、Y軸の応答遅れがあると、曲線PQのように機械が動き、誤差が発生する。

3. パンパン制御方式

3.1 問題点の設定と基本的な考え方

図3に示す修正逆伝達関数補正制御を適用した数値制御工作機械のブロック線図より破線内の非線形要素より成るばね、摩擦を除くと、位置ループの利得 K_P 以下すべて線形要素となり、修正逆伝達関数 $1/G(s)$ を追加することにより、負荷角度 θ_L は指令角度 θ_N と一致する。ところが、非線形要素により前述した過渡的な誤差が生じる。図3においてサーボモータにトルクを加えると、 $1/J_M$ に比例したモータ角速度 ω_M が生じ、モータ角度 θ_M はその積分となる。また負荷にトルクを加えると、 $1/J_L$ に比例した負荷角速度 ω_L が生じ、負荷角度 θ_L はその積分となる。摩擦は図3に示す摩擦モデルのように負荷角速度の運動方向によって正負が切り換わるクーロン摩擦として扱う。したがって、負荷角速度 $\omega_L > 0$ のときは摩擦トルク τ_f は、負荷 J_L に対してはマイナス方向に作用し、 $\omega_L < 0$ になると逆方向に作用し摩擦トルクは $-\tau_f$ となって負荷 J_L にじょう乱として与えられる。ここで駆動系は、ねじり剛性 K_R とねじり粘性 D_R の特性を有するばねとみなすことができ、モータの角速度 ω_M と負荷角速度 ω_L の差に比例定数 D_R を乗じたトルクと、モータ角度 θ_M と負荷角度 θ_L の差に K_R を乗じたトルクを負荷に伝え、モータには反作用として負のトルクを伝える。

図6は軸の動きを示したタイムチャートである。指令角度 θ_N は、時刻Iでプラス方向に一定角速度で回よう指令され、時刻IVでマイナス方向に反転し、時刻VIIIで停止するものとする。モータの角速度 ω_M は、逆伝達関数補正が機能している

Fig.6 Timing chart

ため時刻Ⅰにおいてすぐに立ち上がるが、駆動系はねじり変形するために遅れが生じ、さらに摩擦力が作用するため負荷の角速度 ω_L は時刻Ⅱで所定の角速度に達する。したがって、負荷の角度 θ_L はⅡでは遅れているが、位置ループフィードバックにより誤差を補正する指令が出るので、時刻Ⅲで指令角度 θ_N に追いつく。このⅠからⅢの間の負荷角速度の遅れが、起動時の遅れである。これが1つの軸の動きのみであれば、軌跡の誤差は生じないが、複数軸のときは、軌跡の誤差となる。同様に方向切換え時、停止時には θ_N に対し、 θ_L が遅れる。ただし、停止時は、ねじれを解消する必要がないので、遅れが極めて小さい。以上のように、非線形要素による遅れは、停止から起動する時、および方向切換え後動き出す時に発生する。この遅れに対し、サーボ系全体としては、位置ループの利得アップなど応答を早くする方法はサーボループの安定性が悪くなるので、一過性の外乱として補正を行う方法が安定性を損なわず特性の改善が得られると考え、バンバン制御によって精度改善を行った。ところで、バンバン制御は、停止から起動するとき、および、方向切換え時すなわち速度が零からある値をもつタイミングで電圧、電流などの操作量を加えることにより、非線形要素の誤差を除去する方法でオン・オフ制御ともいう。その性能は、操作量を加える箇所、操作量の値、操作量の印加のタイミング、操作量の印加終了タイミングによって決まる。

そこで、表1に示す速度補正方式、位置補正方式、電流補正方式を検討した。

3.1.1 速度補正方式

指令角度 θ_N の微分である理想角速度 $\dot{\theta}_N$ と負荷角度 θ_L の微分である負荷角速度 $\dot{\theta}_L$ の差に角速度補正ゲイン G_w を乗じた $G_w(\dot{\theta}_N - \dot{\theta}_L)$ を操作量とし、 θ_L が0から変化した時から $\dot{\theta}_L = \dot{\theta}_N$ すなわち負荷角速度 $\dot{\theta}_L$ が理想角速度 $\dot{\theta}_N$ に追いついた時までスイッチをオンにして補正電圧 V_F を加えて補正する方法である。

3.1.2 位置補正方式

指令角度 θ_N と負荷角度 θ_L の差に位置補正ゲイン K_p を乗じた $K_p(\theta_N - \theta_L)$ の操作量を θ_L が0から変化した時から $\theta_L = \theta_N$ すなわち負荷角度 θ_L が指令角度 θ_N に追いついた時までスイッチをオンにして補正電圧 V_F を加えて補正する方法である。

3.1.3 電流補正方式

指令角度 θ_N の微分である理想角速度 $\dot{\theta}_N$ をとり、 $\dot{\theta}_N = 0$ の状態から $\dot{\theta}_N > 0$ に変わった時、あるいは、 $\dot{\theta}_N = 0$ の状態から $\dot{\theta}_N < 0$ に変わった時を起動または方向反転と判定し、バンバン制御回路により補正電流を操作量として印加し、過渡的な誤差を除去する方法である。この電流補正量は、 $\dot{\theta}_N = 0$ か

Table 1 Method of bang-bang control

Method	Block diagram
Speed compensation method	
Position compensation method	
Current compensation method

Fig.7 Flow chart of compensation current method

ら $\dot{\theta}_N > 0$ への変化時には補正電流値 I_{F0} を図3に示すように補正電流 I_F として出力し、 $\dot{\theta}_N = 0$ から $\dot{\theta}_N < 0$ への変化時には補正電流値 $-I_{F0}$ を補正電流 I_F として出力する。この補正電流によりサーボモータに補正トルクを加える。この結果、起動時あるいは方向反転時の駆動系による遅れが小さくなり、負荷は摩擦に打ち勝って動き出せる状態となり負荷角度 θ_L が変化する。このように負荷が動き出すと直ちにバンバン制御回路のスイッチを切って補正電流を切る制御を行う。このフローチャートを図7に示す。まず、スタートすると負荷角度 θ_L の変化を見る。負荷角度 θ_L が変化していれば、負荷は動き出したのだから補正を切る。1サイクル前の理想角速度 $\dot{\theta}_{NOLD}$ が零でかつ今の理想角速度 $\dot{\theta}_N$ が正であれば、プラス方向への動き出しを検出したのでプラス方向への補正電流 I_{F0} で補正し、今の理想角速度 $\dot{\theta}_N$ がマイナスであれば同様にマイナス方向の検出によりマイナス方向の補正電流 $-I_{F0}$ で補正する。今の理想角速度 $\dot{\theta}_N$ が零ならば、バンバン制御の切換えはなく、何らの変化も加えない。今の理想角速度 $\dot{\theta}_N$ を次のサイクルに使うために $\dot{\theta}_{NOLD}$ として、1サイクル時間待つ。

Fig. 8 Simulation circuit

Fig. 9 Simulation of starting characteristics of x-axis (simulation 1)

4. バンバン制御方式選択のためのシミュレーション

バンバン制御を入れない従来方式および表1に挙げたバンバン制御の3方式に対し、起動時と円弧運動における象限切換え時の2つの場合について、機械位置の時間変化を図8に示すパソコンを用いたシミュレーション回路で求めた。X軸の起動特性は、直線指令を分配器に入力して得られた単位時間毎の指令位置をX軸サーボブロックモデルに入れることにより機械位置として得られる。同様に円弧指令を分配器に入力して得られた単位時間毎の指令位置をX、Y軸サーボブロックモデルに入れるとX、Y軸の機械位置となり合成器にて円弧軌跡として出力され円弧運動の特性が得られる。ここで、サーボ定数はパラメータとしてX、Y軸サーボブロックモデルに入れている。

4.1 シミュレーション1

X軸の起動特性のシミュレーションで指令角度 θ_N に対し、モータ角度 θ_M 、負荷角度 θ_L を時間軸で見た。指令角度 θ_N と負荷角度 θ_L の差が起動時におけるサーボ系の非線形要素による応答遅れである。

図9に従来方式のシミュレート結果を示す。指令角度 θ_N の変化に対し、モータ角度 θ_M は修正逆伝達関数補正によりすぐに追従するが、負荷角度 θ_L はねじれを詰めていく過程にあり追従しない。その後、ねじれが詰まり負荷角度 θ_L が遅れて追従する。その後位置ループの効果によりモータ角度 θ_M は指令角度 θ_N より大きくなり、その結果負荷角度 θ_L は指令角度 θ_N に追いつく。負荷角度 θ_L と指令角度 θ_N の差の最大値を起動時最大誤差 E_2 と定義すると、 $E_2 = 20 \mu\text{m}$ と読みとれる。

4.2 シミュレーション2

象限切換え時の応答特性として、図4に示す円弧運動におけるX、Y軸の指令位置と機械位置の関係を送り速度10m/min、

Fig. 10 Comparison of errors generated between conventional control method and bang-bang control methods

Fig. 11 Measurement of errors generated in circular cutting by double ball bar method (experiment)

円弧半径150mmでシミュレーションした。

従来方式では、象限切換え時最大誤差は $E_1 = 30 \mu\text{m}$ であった。このようにして、従来の制御方式とバンバン制御の3方式をシミュレーションし、円弧運動での象限切換え時最大誤差 E_1 および起動時最大誤差 E_2 を棒グラフで表したものを図10に示す。従来方式と比べると、バンバン制御の3方式とも起動時および方向切換え時にそれぞれ効果があることを示しているが、速度補正方式、位置補正方式に関しては、共に操作量を速度指令に入れているので応答が遅いため効果が少なく、電流補正方式は操作量を直接トルクを発生させる電流に補正量として加えているので最も効果があることが分かった。そこで、実機では、電流補正方式を採用することとした。

5. 実機への応用

実機テストでは、高速・高精度加工機（テーブルサイズ1500mm×2500mm、最大積載荷重98kN、切削最高送り速度10m/min）を用い、制御方式としてバンバン制御を適用した場合と、比較のため従来方式を適用した場合について実験を行った。実験1では、X-Y同時2軸の円運動を行わせたときの位置誤差の測定、実験2では、Y-Z同時2軸の直線運動を急斜面または緩斜面で行わせたときの追従誤差の測定、および実験3では、急斜面または緩斜面でのピックフィードを伴ったジグザグ切削試験による食込みの測定を行った。

5.1 実験1（円運動のときの位置誤差）

シミュレーション2と同様X、Y軸による円弧運動での実機による実軌跡を測定した。この実験は、主軸頭であるラムにX、Y軸の円運動の指令を数値制御装置から与え、D.B.B.

Method	Picture of surface	Measurement result
Conventional control		
Current compensation method		

Fig. 12 Improvement of deficit in cutting steep and gentle slope by bang-bang control

法すなわちダブルボールバー装置の一端をテーブル、他端をラムに固定して、円運動を行わせ位置誤差を測定した。この時の実験条件は、シミュレーション2と同様に送り速度10m/min、円弧の半径150 mmである。その測定結果を図11に示す。図11(a)には、バンバン制御のない従来方式の位置誤差、図11(b)には、電流補正方式での位置誤差を示す。これによると、従来方式では位置誤差が27 μm あったものが、電流補正方式により14 μm と大幅に改善されることが分かった。また、図10に示すシミュレーション結果と対比すると、従来方式ではシミュレーションで30 μm が実機で27 μm 、電流補正方式ではシミュレーションで13 μm が14 μm となっており、シミュレーションと実機による実験結果がよく一致している。

5.2 実験2 (Y-Z軸直線運動時の位置誤差)

次に、Y、Z軸同時作動による直線運動での実機における実軌跡を測定した。この実験は図12の上に示す指令値と同じ傾斜をもった測定モデルをテーブル上にセットして、ラムに電子マイクロメータを装着して、ラムに上記測定モデルと同じ直線形状となる数値制御指令を与えて運動させ、起動時の位置誤差を測定した。この時の実験条件は、図5に示す起動点PよりY軸方向に+50 μm 、Z軸方向に-500 μm の急傾斜面に相当する直線運動を送り速度10m/minで終点Qまで行った。この測定結果によると、従来方式については、やはりY軸運動はクーロン摩擦の影響を受けて起動時からの遅れが大きく、指令位置に対して、位置誤差が23 μm もあったが、電流補正方式を適用すると、位置誤差が5 μm と大幅に改善されることが分かった。

5.3 実験3 (ジグザグ切削試験)

実験2で行ったY-Z軸直線運動時の位置誤差の測定を図12の上に示す急斜面をもったワークの切削で確認した。切削はA点から開始し、Xの負の方向に切削し、その次にB点からC点に向け、Y方向に+50 μm 、Z方向に-500 μm 同時にピッチフィードをかける。以下この繰返しで全体の切削を行う。この実験

条件は、工具径20mmの2枚刃ボールエンドミルを使用し、被削材はケミカルウッド、主軸回転数 6000rpm、切込み1mm、切削送り速度 10m/minである。切削後のピックフィードをかけた部分の外観を図12の下左図に、この部分の粗さ測定機による測定結果を図12の下右図に示す。ここで従来方式では、B→C、F→Gなどのピック時において5.2項で示したようにZの動きに対しYの動きが遅れるので、図12の下左図に示すように工具の食込みが生じ、それぞれピック時の食込みが連続した条痕が発生していることが見える。従来機では、この食込み量の測定結果は26 μm と大きい。これに対して、電流補正方式では、7 μm と大幅に改善されていることが確かめられた。

6. 考 察

シミュレーションおよび実機でのテスト結果より、バンバン制御の3方式のうち電流補正方式を、円弧切削でも急傾斜切削または緩傾斜切削でも、もっとも精度が高い最適の方式として選定した。具体的には、速度補正方式は指令速度と機械速度の差に比例した操作量、位置補正方式は機械位置と理想位置の差に比例した操作量、電流補正方式は一定値の操作量としたが、電流補正方式がもっとも立ち上がりがあった。また、操作量を印加する箇所に関しても、応答の早い補正電流 I_F を加える電流補正方式が補正電圧 V_F を加える速度補正方式および位置補正方式よりも有効だった。

7. 結 言

数値制御工作機械におけるサーボ系の非線形要素によるサーボ誤差の軽減をバンバン制御で行い、その結果次の結論を得た。

- (1) 機械の非線形要素の中でバックラッシュは除外し、特に摩擦による誤差を補正する方式としてバンバン制御の適用を考え、速度補正方式、位置補正方式、電流補正方式の3方式をシミュレーションにより、機械の起動時と方向切換え時の位置誤差を比較検討した。この結果、バンバン制御をしない従来方式に比べ、バンバン制御方式が位置誤差を減らし、なかでも電流補正方式がもっとも誤差が少なくなることを確認した。
- (2) 電流補正方式のバンバン制御を組み込んだ数値制御装置を開発し、円弧運動、急斜面あるいは緩斜面運動およびジグザグ切削でバンバン制御方式が従来方式に比べて、形状誤差が著しく改善されることを実機で確認した。

最後に本研究取りまとめにあたり、ご指導・ご助言いただいた三菱重工業(株)広島工場伊藤喜敏工場長ならびに理化学研究所佐田登志夫副理事長に謝意を表します。

文 献

- 1) 是田規之・沖友啓成・津村憲治・津田真祐・渡部 健：修正逆伝達関数制御による工作機械の送りの高速化に関する研究、精密工学会誌、59、8 (1993) 1347.
- 2) 相羽三良：速度帰還のオン・オフ機構による電気サーボ機構の特性改善、精密工学会誌、40、3 (1974) 263.
- 3) 栗本道彦：オンオフサーボ機構による触針式表面あらさ測定機について、日本機械学会論文集、37、300 (1971) 1605.