二重予測制御で同期化した高速・高精度 NC タッピング*

二 見 茂** 中 村 裕 司***

Dual Predictive Control Improves a High-speed Precision Numerically Controlled Tapping

Shigeru FUTAMI and Hiroshi NAKAMURA

A new control algorithm for a numerically controlled tapping is proposed. This algorithm uses two predictive controls. The Z-axis servo has a predictive control and the spindle response is also predicted. By doing so we achieve precise synchronization between the spindle-axis and the Z-axis not only constant velocity phase but also while accelerating and decelerating. An experiment using this algorithm achieved 625 rev/s^2 acceleration and deceleration, 6000 rpm maximum speed and $10 \mu\text{m}$ precision.

Key words: dual predictive control, high-speed precision tapping, numerical control, synchronization between spindle and z-axis

1. 結 言

工作機械の高速化と高精度化は永遠の課題である。タッピング加工機もその例外ではない。タッピング加工の高速化のためにはスピンドル軸の最高回転を高速にするとともに、回転加速・減速度を高くすることが必要である。このときに問題となることは、タッピング動作において最も重要な機能である、スピンドル軸の回転と Z 軸の運動との同期制御である。両軸間の同期誤差を、スピンドル軸が定速回転するときのみならず、回転加速・減速するときにも所望の誤差範囲内に保たなければならない。また通常はスピンドル軸と Z 軸とはサーボ性能が大きく異なる。そのため、スピンドル軸の回転位置を Z 軸の指令に変換して同期制御を行う従属結合の系となる。これも同期制御を難しくしている要因である。また、本論文で取り扱うシステムの場合、NC の構造上、信号の遅れがあり、むだ時間のある系として取り扱わなければならない。

同期制御の提案は多くの文献でなされているが、その内の多くは 2 軸間の同期を単に指令の払い出しを時間軸で同時になるようにするものであり、本課題に対しては不十分な同期精度しか実現できない。文献 1) と 2) は主軸と従属軸との同期制御を取り扱い高い同期精度を実現しているが、逆伝達関数による補償をする制御方法なので、高次の系やむだ時間のある系では同期精度は十分でない。文献 3) は最適制御の観点から同期制御を実現する方法であるが、次数の高い行列演算を必要とするため、現状のコントローラでは計算速度が遅くなり、実用的でない。本稿で提案する NC タッピング加工のための二重予測制御は、Z 軸サーボ系を予測制御⁴⁾すると同時にスピンドル軸の未来の回転位置を予測し、Z 軸の指令とするものである。この制御により従来の方法と比較すると、回転加速・減速時間が 100ms 以下のとき 5 倍以上の同期精度が実現された。このためスピンドル軸の 625 r/s^2 の回転加速・減速度、6000rpm の最高回転速度および加工誤差 $10 \mu\text{m}$ 以下の加工精度が可能になった。

Fig. 1 Velocity pattern of spindle-axis and Z-axis in a tapping process. Z-axis velocity is proportional to that of spindle-axis.

2. タッピング加工と従来の制御

タッピング加工の動作は (図 1 に速度パターンを示す)。

1) 加工物を XY ステージでタッピングすべき位置に位置決めする (0~t1), 2) スピンドル軸を停止状態から最高回転加速度 $A_{\max}$ で加速 (t1~t2), 3) 最高回転数 $V_{\max}$ で定速回転 (t2~t3), 4) 最高回転減速度 $-A_{\max}$ で減速し、停止 (t3~t4) させ、この 2) から 4) の間、Z 軸 (スピンドルの上下運動) をスピンドルの回転位置と同期するように (1 回転につき、ねじのリード) 下方向に運動させ、被加工物にタップを切ることである。ここでねじのリードを L (mm) とすると次式となる。

$$V_z = V_{\max} \times (L/2\pi) \quad (1)$$

その後、ステップ 2) から 4) を逆方向にたどる (t5~t8)。この場合も Z 軸をスピンドルの回転位置と同期させなければならない。スピンドル軸の回転と Z 軸の上下運動とが同期しないと、タップの加工精度が落ち、さらにドリルを破損することになる。

これらの同期制御が難しいのは、スピンドル軸の加減速回

* 原稿受付 平成 11 年 10 月 1 日

** 正 会 員 (株) 安川電機つくば研究所 (つくば市東光台 5-9-10)

*** (株) 安川電機つくば研究所

Fig.2 Conventional control for tapping. Z-axis reference is spindle-axis position multiplied $L/2\pi$ and feedforward signal is also inputted.

転時および定速回転時の両方に、非常に高い同期精度が要求されるからである。また、NC装置に無視できない信号の遅れがあることも、同期精度が高くできない理由のひとつである。

従来のタッピングの制御は、図2に示すように、スピンドル軸を回転制御し、スピンドル軸の回転位置信号をZ軸の指令とし、同期精度を向上するためにZ軸にフィードフォワード制御を付加するものであった。ここで

- $r_s(j)$: 時刻 j のスピンドル軸回転位置指令 (rad)
- $r_z(i)$: 時刻 i のZ軸位置指令 (mm)
- $y_s(j)$: 時刻 j のスピンドル軸回転位置 (rad)
- $y_z(i)$: 時刻 i のZ軸位置 (mm)
- $y_s(j) - y_s(j-1)$: 時刻 j のフィードフォワード信号 (rad)
- $L/2\pi$: 指令換算係数 (mm/rad)

である。ここで、 i はZ軸サーボの制御周期 2ms のサンプリング時間、 j はスピンドル軸の 8ms サンプリング時間である。

フィードフォワード制御だけでは指令に対して完全に追従

させることはできず、またスピンドルの回転加速・減速時と定速回転時において最適なフィードフォワードゲインが異なるために、高い同期精度を達成することは困難であった。

3. 二重予測制御アルゴリズム

提案する二重予測制御アルゴリズムの概略のブロック線図を図3に示す。記号およびスピンドル軸のコントローラは図2のものと同じである。Z軸は予測制御コントローラ⁴⁾になっている。制御周期はスピンドル軸 8ms、Z軸 2ms である。左の四角の中がスピンドル軸の未来値予測の計算を行うブロックである。

予測制御では未来の指令が必要である。しかし、一般には未来情報を得ることはできない。本制御方法では未来情報を得るためにスピンドル軸の指令をバッファメモリに通し $r_s(j+1)$, $r_s(j)$ と 1 サンプル遅らせ、擬似的に未来情報を得ている。この遅延はスタートボタンが押された後、1 サンプル時間 ($T_s=8ms$) の動作開始を遅らせるだけであり、実際上何ら問題ない。スピンドル軸の指令には 1 サンプル遅れた指令 $r_s(j)$ が入力される。

未来位置予測器 (Future position predictor) は指令値 $r_s(j-1)$, $r_s(j)$, $r_s(j+1)$ と時刻 j のスピンドル軸の回転位置信号 $y_s(j)$ から、スピンドル軸の未来の回転位置予測値 $y_s^*(j+1)$, $y_s^*(j+2)$ を計算する。

Z軸指令発生器 (Z-axis reference generator) はこの情報から、Z軸の未来指令値列

$$r_z(i+m): m=1, \dots, 4 \quad (2)$$

を出力する。Z軸の予測制御コントローラは、式(2)の指令値列を得て、予測制御を行う。以上が、二重予測制御アルゴリズムのブロック線図の概要である。

3.1 予測制御アルゴリズム

Z軸の予測制御アルゴリズムについて述べる。制御の目的は、制御対象の出力 (モータ位置) $y(i)$ を任意の目標指令 $r(i)$ に一致させるような制御入力 $u(i)$ を決定することである。この決定は、制御対象の動特性モデルと未来の目標指令 $r(i+m)$

Fig.3 Block diagram of dual predictive control for tapping

$m=1,2,\dots,M$ とを利用して以下のように行われる。まず、未来の出力の予測値 $y^*(i+m)$ を次式で与える。

$$y^*(i+m) = \sum_{n=0}^{N_a} A_{mn} \cdot y(i-n) + \sum_{n=0}^{N_b} B_{mn} \cdot u(i-n) \quad m=1,2,\dots,M \quad (3)$$

ここで、 N_a, N_b, A_{mn}, B_{mn} は制御対象の動特性モデルから求める定数であり、 M はどのくらい先まで予測するかを決める予測区間である。本論文では、速度ループの応答を（むだ時間＋一次遅れ）と近似した ARX モデルを用いた。具体的には、 $N_a=2, N_b=3, M=4$ とし、 A_{mn}, B_{mn} は、

$$A_{mn} = \begin{pmatrix} 2.368 & -1.736 & 0.3679 \\ 2.503 & -1.871 & 0.3679 \\ 2.553 & -1.921 & 0.3679 \\ 2.571 & -1.939 & 0.3679 \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$B_{mn} = \begin{pmatrix} 0 & 0.0112 & -0.0032 & -0.0081 \\ 0.0112 & 0.0234 & -0.0002 & -0.0081 \\ 0.0346 & 0.0279 & 0.0009 & -0.0081 \\ 0.0626 & 0.0296 & 0.0013 & -0.0081 \end{pmatrix}$$

である。

未来の偏差予測値 $e^*(i+m)$ を

$$e^*(i+m) = r(i+m) - y^*(i+m) \quad (5)$$

で与え、評価関数

$$J = \sum_{m=1}^M w_m \cdot \{e^*(i+m)\}^2 + c \{u(i)\}^2 \quad (6)$$

が最小となるように、制御入力 $u(i)$ を決定する。上式を最小にすることは、未来の偏差を小さくすることを意味する。 w_m は重み係数である。また制御入力にける重み c は補正強度を調整するパラメータである。本論文では w_m はすべて 1.0 とし、重み c は試行錯誤的に決定した。

式 (6) を $u(i)$ で表し、スカラー変数 $u(i)$ について、

$$\frac{\partial J}{\partial u(i)} = 0 \text{ を解くと、} \frac{\partial^2 J}{\partial u(i)^2} > 0 \text{ であるから、次式が評価関}$$

J を最小とする制御入力 $u(i)$ となる。

$$u(i) = \sum_{m=1}^M q_m \cdot r(i+m) - \sum_{n=0}^{N_a} p_n \cdot y(i-n) - \sum_{n=1}^{N_b} g_n \cdot u(i-n) \quad (7)$$

となる。ただし、定数 q_m, p_n, g_n は動特性モデルより求めた前述の定数と、評価関数式の重みとからあらかじめ計算される。

予測制御では式 (7) の制御入力 $u(i)$ をサンプリングごとに計算し、モータコントローラへ出力する。

本論文の場合、 $M=4, N_a=2, N_b=3$ であり、

$$q_m = (0, 1.339, 4.133, 7.462)$$

$$p_n = (33.09, -24.91, 4.758)$$

$$g_n = (-0.0077, 0.0131, -0.1043) \quad (8)$$

である。

3.2 スピンドル軸の未来位置の予測アルゴリズム

未来位置予測器は、バッファメモリに記憶された $r_s(j-1), r_s(j), r_s(j+1)$ と、スピンドル軸の現在位置 $y_s(j)$ および過去的位置からスピンドル軸の未来の予測位置 $y_s^*(j+1), y_s^*(j+2)$ を次式で予測する。

$$\Delta y_s^*(j+m) = \sum_{n=0}^{N_a'-1} A'_{mn} \cdot \Delta y_s(j-n) + \sum_{n=1}^{N_b'-1+m} B'_{mn} \cdot \Delta r_s(j+m-n) \quad m=1,2 \quad (9)$$

ここで、 Δ は増分、 $N_a', N_b', A'_{mn}, B'_{mn}$ は主軸位置制御系の動特性モデルより求める定数である。

本論文の場合、

$$N_a' = 1, N_b' = 2$$

$$A'_{mn} = (0.7056, 0.5927)$$

$$B'_{mn} = \begin{pmatrix} 0.1600 & 0.1344 & 0.0 \\ 0.1600 & 0.1344 & 0.1129 \end{pmatrix} \quad (10)$$

である。

指令変換器は、式 (9) で求めたスピンドル軸の位置予測値にしたがって、Z 軸の未来指令 $r_z(i+m)$ 、 $m=1, \dots, 4$ を出力する。さらに微調整器は、スピンドル軸指令 $r_s(j)$ とスピンドル軸回転位置 $y_s(j)$ とから、同期ずれの微調整を行うための信号を算出し、Z 軸コントローラへ出力する。

以上のように、Z 軸の予測制御と、その未来指令値を作るための予測器との、二つの予測機能を備えることによって、従来には非常に高精度・高速な同期追従制御が実現される。また、これらの予測演算は、スピンドル軸および Z 軸の動特性のみでなく、コントローラ各部の通信時間や演算時間、検出時間などの遅れもすべて考慮することができる。

4. シミュレーション

前章で導いた二重予測制御アルゴリズムをシミュレーションで確認した。シミュレーションプログラムには MATLAB および SIMULINK を用いた。図 4 は離散時間系で表したブロック線図、図 5 はシミュレーション結果の一例である。

図 4 において、 z^{-1} ：8ms の遅延、 Δ ：増分値を表す記号、 A'_{mn}, B'_{mn} ：式 (9) の定数、 $G_s(z)$ ：スピンドル軸の動特性、 $G_f(z)$ ：微調整部の伝達関数（本例では定数）、 $G_r(z)$ ：Z 軸未来指令値演算部の伝達関数、本例では四則演算、 $G_z(z)$ ：Z 軸の動特性である。

スピンドル軸の動特性は、比例ゲイン 20 s^{-1} の比例制御系、Z 軸の動特性は式 (7) の予測制御系とした。また、機構系はそれぞれ剛体と仮定した。図 5 はシミュレーション結果の一例である。スピンドル軸の回転速度指令、スピンドル軸の回転応答、およびスピンドル軸と Z 軸との同期誤差 ($\times 200$) を示している。スピンドル軸の速度指令は台形波状で、最高回転速度は 6000rpm であり、回転加速・減速度は 6000rpm/120ms である。

台形波状のスピンドル軸の指令に対して、スピンドル軸の応答は遅れて応答している。太い線は、同期誤差を表している。静止からの動き出し、加速・減速から一定速度への過渡時、減速から停止の過渡状態において、同期誤差が発生している。しかし、タッピング動作の全工程において、同期誤差は ± 10 パルス以内になった。この結果は従来法の 1/5 である。

Fig.4 Simulated digital block diagram of dual predictive control. G_s , G_z are transfer functions of Spindle and Z axes. y_s , y_z are position responses. Synchronizing error was calculated as $\{(L/2\pi) y_s - y_z\}$ where L is lead of a screw.

Fig.5 Simulated time responses of dual predictive control. Rotational reference velocity was trapezoidal pattern and acceleration and deceleration time were both 160ms. Maximum synchronizing error was better than ± 10 pulse.

5. 実験

実験を行った。NC 装置は型式 YASNAC J50 と称するものであり、スピンドル軸は 6kW(型式 USAIKM-60)のモータ、コントローラは型式 SGDB-60、Z 軸は 500W のサーボモータ(型式 SGMG-05)、コントローラは型式 SGDB-05 である。サーボモータコントローラに予測制御を組み込み、NC 装置にスピンドル軸回転位置の予測演算機能を組み込んだ。

まず空切削における従来方式と二重予測制御方式との比較実験の結果を図 6 に示す。横軸はスピンドル軸の加減速時間(0~6000rpm)であり、縦軸はタップ加工の 1 サイクル中でのスピンドル軸と Z 軸との最大同期誤差である。この誤差が小さいほどタッピング加工の精度が向上し、高速化が可能となる。

上の曲線が従来方式の同期誤差であり、下が二重予測制御の同期誤差である。両者の差は歴然としており、二重予測制御の効果が明らかである。従来方式では Z 軸のトルクが飽和するため、加減速度を 150ms 以下にはできなかった。二重予測方式では同じモータとコントローラで 75 ms の加減速が達成された。従来方式では、スピンドル軸を 6000rpm まで加速

するのに加減速時間を 500ms 以上にしないと必要な同期精度が得られなかった。これに対し、二重予測制御方式では 100ms 以下の加減速時間でもより小さな同期誤差が得られた。このことによりタッピング加工のサイクルタイムが大幅に短くでき、高速化が図られる。

実切削における二重予測制御の同期誤差のデータを図 7 に示す。加減速時間は 160ms である。横軸はタッピング加工の動作状況であり、穴口からタッピング加工が始まり、穴底までタッピング加工を行い、穴底まで達したら反対方向に戻る、という動作である。タッピング時のみならず、戻り時においても同期誤差を小さくすることが必要である。タッピング加工の全動作において、約 10 パルス以下の同期誤差が達成された。1 μ m/pulse であるから $\pm 10 \mu$ m の精度である。

6. 結 言

タッピング加工の精度向上と高速化を計る二重予測制御を提案した。シミュレーションにおいてその効果を確認した。実機における空切削実験において、従来方式よりはるかに同期誤差が小さいことが確認された。実切削におけるタッピン

Fig.6 Experimental maximum synchronizing errors of the conventional control and the dual predictive control in tapping movements without cutting for various acceleration and deceleration time

グ加工の全動作において、同期誤差が $\pm 10 \mu\text{m}$ 以下であることが確認された。この時の回転加速・減速度は $6000\text{rpm}/160\text{ms}$ で従来の制御の5倍である。

提案した二重予測制御は、タッピング加工のみならず精密な同期制御が必要な用途に利用できると考える。

Fig.7 Experimental results of synchronizing error during a tapping process. Better than 10 pulse error was obtained. The acceleration and deceleration time was 160 ms.

参考文献

- 1) 中村正俊, 冷水大作, 久良修郎: 主軸従軸関係をもつメカトロサーボ系の主軸位置同期を図った高精度輪郭制御法, 計測自動制御学会論文集, 33, 4 (1997) 274.
- 2) 中村正俊, 冷水大作, 中村光児, 久良修郎: メカトロサーボ系の2次モデルを用いた従軸追従形の主軸位置同期制御方法, 計測自動制御学会論文集, 33, 9 (1997) 975.
- 3) 江上正, 依田一宏: メカトロサーボ系の最適同期化経路制御, 計測自動制御学会論文集, 34, 9 (1998) 1178.
- 4) 二見茂, 中村裕司, 鶴田和寛: 予測制御による高速位置決め, 1995年度 精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (1995) 35.