高速・高精度加工のための予見学習サーボ制御機器*

中村裕司**

Preview-learning Controller for High-precision and High-speed Machining /
Hiroshi NAKAMURA

Key words: learning control, repetitive control, preview control, predictive control, motor position controller, high-precision machining, high-speed machining

1. はじめに

マイクロプロセッサを用いてコントローラをソフトウェアで実現することにより、従来のハードウェアでは困難であった複雑な制御アルゴリズムの応用が可能となった。

一方NC工作機械の加工速度、加工精度に対する要求は年々厳しいものとなり、従来の制御方式では対応が困難になってきており、新しい制御方式の出現が望まれている。

目標指令に制御対象の出力を追従させたい場合、通常、フィードバック制御が利用される。たとえばモータの位置追従制御の場合、位置のフィードバックループが組まれ、さらにその内側に速度ループ、電流ループなどが組まれる。

この場合、追従特性改善の最も直接的な方法は、ループゲインを上げることである。しかし、過大なゲインは機械系の振動を誘発するため、達成できる追従速度および精度には限界がある。

このため、位置指令や速度指令などの指令自体を補正することが考えられる。このようなフィードフォワードの補正を有効に利用する方法として、予見・予

測制御（以下便宜上予見制御と総称する）や、学習・繰返し制御（以下学習制御と総称する）が注目されている。

本稿では、予見制御、学習制御の特徴を述べ、この両者を組み合わせた予見学習制御について紹介する。

2. 予見学習制御

2.1 予見制御

予見制御の“予見”とは、“^{あらかじめ}予め見る”ことであり、予見制御^{1)~3)}では、次の2つの“見る”動作が行われる。

- ① 未来の目標指令を見る。
- ② 制御対象のモデルと、未来の外乱（予測）値とを利用して、未来の出力を予測によって見る。

この2つの未来情報（目標指令と出力予測値）の差が偏差予測値となる。偏差予測値に関する評価関数を最小とするように制御入力を決定すると、予見制御となる。

予見制御では、目標指令が急峻に立ち上がる場合でも、制御入力にそれに先だって立ち上がり、追従偏差の少ない、滑らかな応答が実現される。

この特徴は、我々が車の運転をする場合を考えると、理解できる。初めて乗る車で、しかも車のすぐ前だけを見ながら運転するよりも、車の性能を知ったうえで、数十m先までを見ながら運転したほうが、より正確でスムーズな運転になる。

しかし予見制御では、未来出力の予測の際に、制御対象の正確なモデルと未来の外乱情報とが必要であり、これらの情報の不完全さによって追従偏差が生じてしまう。

* 原稿受付 平成5年4月22日

** (株)安川電機つくば研究所（つくば市東光台5-9-10）

1985年早稲田大学大学院電気工学専攻修士課程修了。同年(株)安川電機入社。現在、つくば研究所にて、ロボット・工作機械制御技術の研究開発に従事

図1 予見学習制御の概念図

2.2 学習制御

繰り返し動作に限定するならば、学習制御が有効である。学習制御は、わが国で最初に提案されたもので、これまでに多くの研究がなされている⁴⁾⁵⁾。

学習制御では、目標指令が同じパターンを既知の周期で連続的に、あるいは間欠的に繰り返すことを前提に、前回試行時の偏差と制御入力を利用して、試行のたびに制御入力を補正する。

したがってこの制御では、制御対象の動特性モデルが未知である場合でも、試行を重ねることにより、最終的にはサーボ系の遅れや周期的な外乱に対して定常偏差のない、高精度な追従動作を実現できる。

たとえば、記憶力の良いドライバが周回コースを何度も回り、試行のたびに前回の同じ時刻におけるずれとハンドルさばきを思い出してハンドルのきり方を変えていくわけで、車の性能を知っていなくても、最後には正確に走れるようになる。

2.3 予見学習制御

同じコースを繰り返し回る場合には、当然ドライバは、これから進むべきコースの情報を得ることができる。そこで、前述の予見制御の2つの“見る”動作を加えることにより、学習制御と予見制御とを組み合わせることが効果的であると考えられる。これが予見学習制御である。

予見学習制御の概念図を図1に示す。 k 回目試行時の時刻 i における制御入力 $u_k(i)$ は、前回試行時の制御入力 $u_{k-1}(i)$ から補正

量 $\sigma_k(i)$ だけ補正される。

$$u_k(i) = u_{k-1}(i) + \sigma_k(i) \quad (1)$$

補正量 $\sigma_k(i)$ は、偏差予測値 e_k^* の重み付き2乗和

$$J = \sum_{m=1}^M w_m \{e_k^*(i+m)\}^2 \quad (2)$$

を最小とするように決定すると、次式で与えられる⁶⁾。

$$\sigma_k(i) = \sigma_k(i-1) + \Delta\sigma_k(i) \quad (3a)$$

$$\Delta\sigma_k(i) = \sum_{m=1}^M q_m e_{k-1}(i+m) + Q(e_k(i) - e_{k-1}(i)) - \sum_{n=1}^{N-1} g_n \Delta\sigma_k(i-n) \quad (3b)$$

ここで、 M は予測区間、 N は制御対象モデルとして利用するステップ応答のサンプル点数である。 q_m 、 Q 、 g_n は、偏差予測値にかかる重み w_m と制御対象のステップ応答からあらかじめ算出される定数である。

なお式(1)、(3)の制御式は、各サンプリング周期間に、リアルタイムで制御入力決定するものであるが、各試行間に次回1試行分の制御入力をまとめて算出する制御式も同様に求められる⁷⁾。

3. 予見学習制御の実験データ

予見学習制御は、指令の補正を行うものであり、従来のフィードバック制御系に、その構成および各ゲインなどを変更することなしに組み込むことができる。

本章では、モータ位置制御系(図2)に適用し、高速・高精度な追従動作を実現した例を紹介する。制御対象は、DCサーボモータを用いた従来の位置制御系であり、その帯域幅は8 Hzである。位置比例制御と予見学習演算は、パソコン(PC 9801)上でC言語により、サンプリング周期2.5 msで行った。

目標指令 $r(i)$ は同じパターンを連続して繰り返す位置指令であり、制御入力 $u(i)$ は従来の位置制御系への位置指令である。出力 $y(i)$ はモータの位置であり、エンコーダにより1パルスあたり 7.85×10^{-4} radで検出した。

図2 実験システム

図3 追従精度に関する実験結果

3.1 高精度性の確認実験

図3に精度に関する実験結果を示す。目標指令は振幅2000パルス、周波数0.5Hzの正弦波であり、4回の学習で偏差が ± 1 パルス以内に収まっている(図3(a))。

比較のため、従来の位置制御系のみを用いた($u=r$ とした)場合を図3(b)に、制御入力 u の位相と振幅を試行錯誤的に補正した場合を図3(c)に示す。なお、図3(a)と(c)では、偏差が小さいため出力 y は目標指令 r と重なっている。

図3(c)において、制御入力 u は目標指令 r に対し、位相は 4.50° 進め、振幅は1.002倍としたが、位相と振幅の補正だけではまだ偏差が残っている。これは、摩擦、モータトルクリップル、速度検出器リップルなどによるものである。

予見学習制御による補正では、これら再現性のある外乱の影響も取り除かれている。本制御法を用いれば、人手を介した試行錯誤の必要もなく、速やかに制御入力が決定される。

3.2 高速応答性の確認実験

図4に追従速度に関する実験結果を示す。目標指令は振幅1000パルス、周波数10Hzの正弦波と、振幅200パルス、周波数40Hzの正弦波との合成信号である。5回の学習で、制御対象の帯域幅の5倍の周波数に、ほぼ追従している(図4(a))。従来の位置制御系のみを用いた場合を図4(b)に示す。

なお、ステップ応答サンプル数 N は、ステップ応答が整定する値(本実験の制御対象では約50)より小さくし過ぎると、予測誤差が大きくなり応答が劣化する。本実験では25以上に設定すれば応答の劣化はみられなかった。また予測区間 M は、大きくするほ

図4 追従速度に関する実験結果

ど安定性が高くなる反面、追従速度や学習の収束速度が遅くなる。図3の実験では $M=15$ 、図4の実験では高速性を重視して $M=5$ とした。

4. 予見学習コントローラ

開発された予見学習コントローラ(JZNC-ZU150)は、従来の位置比例制御と予見学習演算機能を内蔵しており、以下の特徴を持つ。

- ・数回の試行で学習を完了し、高速・高精度の追従性能を実現
- ・基本軸のエンコーダ信号に同期して、複数台による並列同期運転が可能
- ・パソコンにより、目標指令、パラメータの入力、および、偏差などのモニタ、が可能

図5に並列同期運転例を示す。同図において、各予

図5 並列同期運転例

図6 予見学習コントローラによる軌跡結果

見学習コントローラは、パソコンによって入力された、主軸角度に対する各刃具の移動形状を目標指令として、主軸エンコーダ信号に同期して、各刃具のモータを制御する。

2組の予見学習コントローラ、速度制御器 (CPCR-FR 01 RB)、DC モータ (UGRMEM-02 M) により、XY テーブル (NSK 社製 CD 0505-404) を駆動し、固定したペンで描いた軌跡結果を図6に示す。1周期は3.64sであり、直径50mmの円部分の速度は126mm/sである。

なお、本予見学習コントローラは、精密機械部品の高速切削加工に適用され、好結果を得ている。

5. おわりに

本稿では、高速・高精度の位置制御を実現する手法として、予見学習制御を紹介した。本制御により、旋盤、マシニングセンタなどにおいて、繰返し性のある加工の高速・高精度化が実現される。また本制御は、カムをモータへ置き換える際にも、非常に有効な手法である。

参考文献

- 1) 土谷武士：予見制御の理論，日本機械学会誌，**93**，856 (1990) 192.
- 2) D. W. Clarke, C. Mohtadi and P. S. Tuffs: Generalized Predictive Control - Part I and II, Automatica, **23**, 2, (1987) 137, 149.
- 3) 西谷紘一：モデル予測制御の応用，計測と制御，**28**，11 (1989) 996.
- 4) 原 辰次：繰返し制御，計測と制御，**25**，12 (1986) 1111.
- 5) 有本 卓：学習制御の理論，日本機械学会誌，**93**，856 (1990) 180.
- 6) 中村裕司：予見学習制御とそのサーボモータ位置制御への応用，計測自動制御学会論文集，**27**，12 (1991) 1382.
- 7) 中村裕司：予見学習制御とその収束条件，第34回自動制御連合講演会予稿集，(1991) 205.