

# 310 NC工作機械の輪郭運動誤差の解析(第1報)—コーナ一部分の運動誤差解析—

Analysis of Motion Error of CNC Machine Tools (1st Report) Analysis of Motion Error at the Corner

○ 正 松原 厚 (京大工), 鳩崎 敬 (京大工), 正 茨木創一 (京大工)

Atsushi MATSUBARA, Kyoto University, Yoshidahonmachi, Sakyouku, Kyoto  
 Takashi HATOZAKI, Kyoto University  
 Soichi IBARAKI, Kyoto University

This paper deals with the analysis for motion error of the XY table of NC machine tools. When the table moves along corners, the overshoot or undershoot occurs due to the several mechanical and control factors. In order to clarify the mechanism, the simulation model of feedforward and feedback control block as well as mechanical block is used. By comparing the simulated and measured motion trajectory on an existing machine, it was found that the simulation could predict the motion errors at the corner, which can be interpreted into servo errors and mechanical errors.

*Key Words*: NC Machine Tools, NC Servo System, Motion error, KGM measurement, Servo error

## 1. 緒 論

近年, NC工作機械送り系の高速化が一段落し, 輪郭運動誤差の低減が重要な課題となっている。円運動における輪郭運動誤差の解析については様々な研究がなされ, サーボゲインや機械特性と運動精度の関係は明らかになってきている<sup>1)</sup>。しかし, 急激な加減速が伴うコーナ部分において発生するコーナだれやオーバシュートといった輪郭運動誤差と機械特性およびサーボパラメータの関係については不明な点が多い。本研究では, 2軸同期運転を行う場合のコーナ部分での輪郭運動誤差について, モデルを用いてシミュレーションを行う。実機の輪郭運動誤差をKGMにて測定して, この結果が妥当かを検証し運動誤差の解析を行う。

## 2. シミュレーションモデル

図1に一般的なNC工作機械の位置決め系の構成を示す。本研究では主にシミュレーションによって同期誤差と各部の特性との関係を明らかにする。このため図1の全体システムの各部の機能を次のようにモデル化する。なお, 指令値生成部以降の1軸のブロック線図を図2に示す。

(1) 指令値生成部: 移動指令に加減速処理を行い, サンプリング時間毎の指令値を補間により生成し, 角軸に分配する。加減速タイプには台形加減速, 指数加減速, S字加減速があるが, 本研究では台形加減速を用いる。指令値に加減速を加味するタイミングとして, 補間前と補間後がある。補間後に加減速処理を行うと, 加減速に伴う同期誤差が発生

するため補間前加減速による指令値生成を行う。

(2) フィードバック制御器: 従来, 比例制御器であったが, 近年, 高次化位置制御器 (High Order Position Controller, HPC) が導入されている。比例制御の場合は  $G_p(s) = K_p$ : 位置ループゲイン (rad/s) である。HPCはハイゲイン化と機械系の振動抑制機能を併せ持つ。HPCとしては竹下らが提案した以下の2次の位置制御器<sup>2)</sup>を採用する。

$$G_p(s) = \frac{k_1 k_2 K_p^2}{s^2 + k_2 s + k_1 k_2 K_p^2} \quad (1)$$

ただし,  $k_1 (=8/3)$  と  $k_2 (=6)$  は制御定数である。

(3) フィードフォワード制御器: 次式で表される1次の制御器とした。

$$G_f(s) = 1 + \frac{K_f}{K_p} s \quad (2)$$

ここで,  $K_f$ : フィードフォワードゲイン (%) である。

(3) 送り駆動機構: ロータリーエンコーダで測定されるモータ位置からリニアエンコーダで測定されるテーブル位置までの動特性を表現する必要がある。ここでは

$$G_m(s) = \frac{\omega_i^2}{s^2 + 2\zeta_i \omega_i s + \omega_i^2}, \quad i = x, y \quad (3)$$

をモデルとして採用した。

シミュレーション結果を実機で検証するための測定値は指令位置 (FF処理前と後), モータ位置  $y_m$  (ロータリーエンコーダ値), テーブル位置  $y_t$  (リニアエンコーダ値) と工具位置  $y_{tool}$  である。指令位置とエンコーダ値は CNC のデータロギング機能を用いて測定し, 工具位置は KGM 法

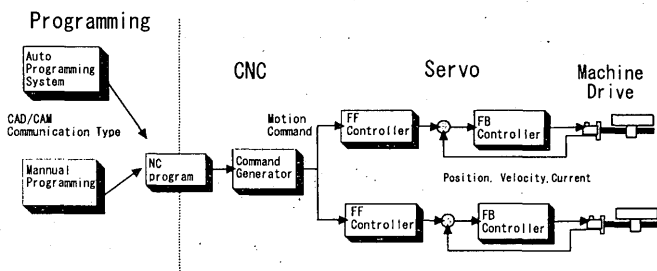


図1 NC工作機械の位置決め系の構成

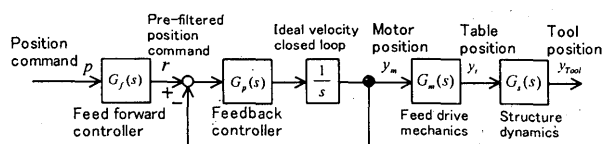


図2 1軸のブロック線図 (指令値生成部以降)

表 1 XY 軸の仕様

	X axis	Y axis
ガイド種類	リニアボールガイド	
ボールねじリード mm	16	
ストローク mm	561	431
最高送り速度 m/min	48	
最高加速度 m/s <sup>2</sup>	9.4	7.3
制御タイプ	Semi-closed control	

を用いて測定した。2軸分の位置を組み合わせプロットし、輪郭運動誤差を評価する。

### 3. シミュレーションと実験による運動誤差解析

#### 3.1 サーボ誤差の解析

解析対象とした立型マシニングセンタのXY軸の仕様を表1に示す。この機械はXYテーブルタイプの送り構成になっている。コーナー部での運動誤差解析を行うために図3に示す斜め45度の直線をつないだ位置指令を与え、モータ位置のシミュレーションを行った。また実際にX、Y軸を運転し、モータ位置 $y_m$ をサーボデータロギング機能で測定した。この結果を比較したのが図4である。ただしフィードフォワードゲイン $K_f=51\%$ としている。運動軌跡の測定値はシミュレーション値に比べコーナーの丸みがやや大きく、Y軸の運動反転後の挙動もやや異なる。シミュレーション値と測定値の差は $5\mu\text{m}$ 程度である。

モータ位置は位置ループゲインが低いときにコーナーでオーバーシュート的な特徴が顕著になる。これは、フィードフォワード制御により、コーナー部でのX、Y軸の指令値は位置ループゲインが低いときほど大きめに与えられるためである。フィードフォワードゲインは円弧補間運動の半径減少を最小にするように設定されているが、位置ループゲインが低いとき、コーナー指令としてはやや過大になっていることがわかる。

#### 3.2 機械誤差の解析

式(3)の2次系の入力にモータ位置 $y_m$ の実測値を与え、テーブル位置 $y_t$ をシミュレートする。これより得られた輪郭運動軌跡が実測結果に対して許容誤差 $5\mu\text{m}$ になるように機械パラメータ $\omega_i$ 、 $\zeta_i$ を同定した。同定には位置ループゲイン $K_p=33$ で運転したときのテーブル位置の実測結果(図5)を用いた。また、工具位置 $y_{Tool}$ をKGM法で測定し、 $y_{Tool}=y_t$ とした。機械パラメータの同定値を用いて $K_p=51$ と75のときの運動軌跡をシミュレーションし実測結果と比較した。 $K_p=75$ の時の結果を図6に示す。テーブル誤差の輪郭運動軌跡のシミュレーション値と実測値の差はやはり $5\mu\text{m}$ 程度であり、 $K_p=51$ の時も同様な結果が得られた。機械特性によりモータ位置からテーブル位置までの応答が遅れる。位置ループゲインが高くなると、この遅れが少なくなるためコーナーでのオーバーシュート的な特徴が緩和される。

#### 参考文献

- 濱村 実 他: 慣性力と粘性抵抗が円弧補間運動誤差に及ぼす影響に関する研究, 精密工学会誌, Vol.69, No.9(2003), pp.1306-1311.
- 竹下虎男 他: CNC サーボシステムの性能向上に関する研究 (NC サーボ追従性改善の一方法), 機論C編, Vol.63, No.615(1997-11), pp.174-178.

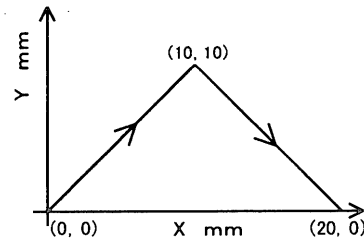


図3 過渡応答評価のための位置指令 (送り速度: 3000mm/min)

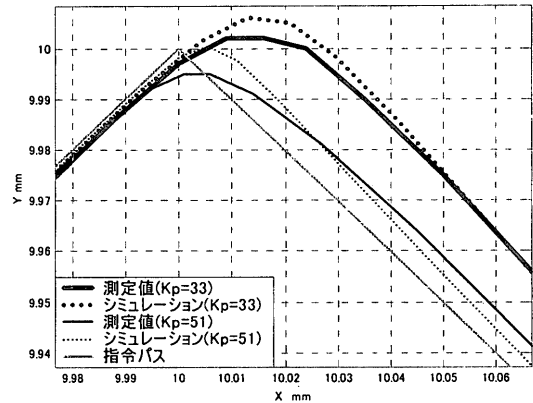


図4 モータ位置のシミュレーションと KGM 測定結果

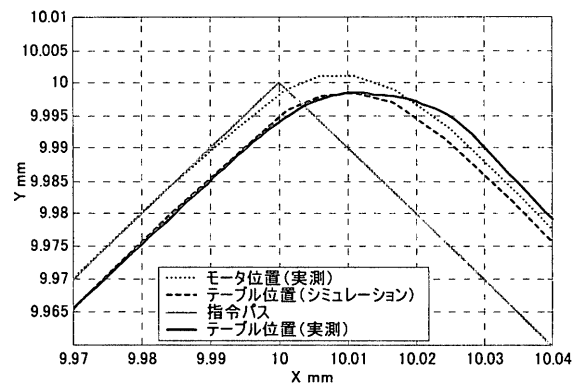


図5 テーブル位置のシミュレーションと KGM 測定結果 ( $K_p=33$ , 同定時)

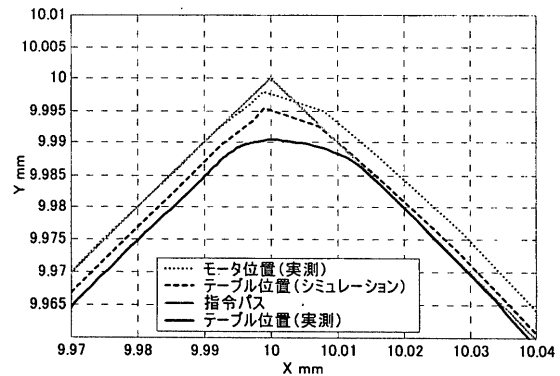


図6 テーブル位置のシミュレーションと KGM 測定結果 ( $K_p=75$ )