

輪郭運動誤差測定に基づいたサーボパラメータのオートチューニングに関する研究

京都大学 上林功治, 茨木創一, 松原 厚, 垣野義昭

要旨

本研究ではNC工作機械の輪郭運動誤差の測定値が最小になるように制御機内のサーボパラメータを調節する手法を提案する。その第一段階として、位置ループゲインのチューニングを行う手順を考案し、実機にて検証を行った。

1. 結論

近年のNC工作機械の高速・高加減速化にともない、加減速時に発生する振動やオーバーシュートが軌跡誤差を増加させるケースが目立ってきた。このため、単に制御器内のフィードバックゲインを上げるだけでなく、サーボ誤差と機械誤差の妥協をはかる必要がある。本研究では、NC工作機械の輪郭運動誤差を計測し、それに基づいて繰り返し学習的に最適なサーボパラメータチューニングを行う方法を提案し、これを実機で検証する。本論文では位置ループゲインのチューニングについて述べる。

2. チューニングの基本手法

2.1 2次元輪郭運動特性のモデル化に基づくチューニング法

各軸の送り系の周波数特性を測定し、同定された送り系のモデルを利用して制御器のゲインチューニングを行なう手法が研究されている¹⁾。しかし、このようなモデル同定には準備と手間が必要であるため、現場では輪郭運動誤差の測定結果に基づいてチューニングが行なわれることが多い。

本論文で提案する手法では、機械の輪郭運動誤差の測定と簡単なモデル同定、モデルを用いたシミュレーションによりサーボパラメータのチューニングを行う。測定と簡易モデルを用いたサーボパラメータのチューニングを学習的に繰り返すことによって、能率よく確実にパラメータの最適値を探索することができるかを検証する。

2.2 輪郭運動誤差の測定方法と対象機

輪郭運動誤差の測定方法にはDBB法、KGM法がある。また小型のマシニングセンタでフルロード制御運転している場合はリニアエンコーダ信号を用いることもできる。これはリニアエンコーダで測定されたサーボ位置と工具端・テーブル端位置との差が小さいためである。本研究では、リニアエンコーダの測定値をCNC外部からモニタリングし、2軸分の運動軌跡を組み合わせるとしてプロットすることによって輪郭運動誤差を評価する。

2.3 送り系のシミュレーションモデル

NC工作機械送り系の動的モデルは過去にいくつか提案されている¹⁾。機械の輪郭運動誤差に大きな影響を及ぼす

のは、主に送り系の低周波数域の動特性であるため、サーボモータ、電流制御ループ、速度制御ループなどの動特性は考慮しなくてよい。また、送り形の時間応答にもとづき、オンラインで同定するため、できるだけ簡単な同定しやすいモデルが必要である。以上を考慮して、本論文では以下のようなモデルを考える。

まず、サーボ制御系については低周波数域の動特性で支配的なのは位置ループの特性であることを考慮し、位置制御器のみをモデル化する。従来、位置制御器は比例項で構成されることが一般的であったが、近年のCNCには追従性とノイズ除去特性を改善することを目的に高次化位置制御器²⁾(High Order Position Controller, HPCと略す)が用いられる場合があり、本研究でもこの制御器を用いる。図1はHPCと理想化された速度制御器($=1/s$)のブロック線図を示す。図中の X_{pi} は位置ループの入力信号、 X_{po} は位置ループの出力信号、 K_p は位置ループゲイン、 k_1 ($=8/3$)と k_2 ($=6$)は制御定数である。機械構造部においては、テーブルの弾性と粘性を考慮する。このためシミュレーションモデルは2次系の振動要素を位置ループに含んだ図2のモデルとする。

チューニング方法の検証に用いる立型マシニングセンタXY軸の仕様と標準的な位置ループゲイン K_p の設定値を表1に示す。

3. 位置ループゲインのチューニング

3.1 チューニングに使用するモデル

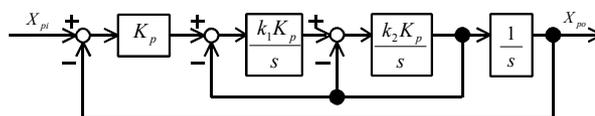


Fig. 1 Block diagram of HPC and ideal velocity control

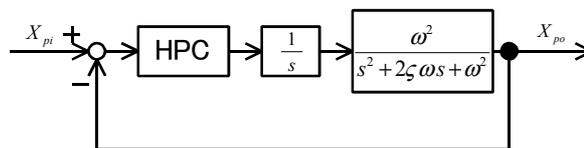


Fig. 2 Identification and simulation model

Table 1: Major specifications of XY axis of the machine

	X axis	Y axis
Type of table guideway	Linear ball guideway	
lead of ball screw mm	16	
Stroke mm	561	431
Maximum travel speed m/min	48	48
Maximum acceleration rate m/s ²	9.4	7.3
Type of position control	Full-closed control	

実験機は XY テーブルタイプの送り構成になっている。このような構成の場合、駆動重量の差から X 軸の機械応答が Y 軸のそれと比べて十分に高くなるケースが多い。本実験機の場合も同様であったので、X 軸の機械特性を理想化して、X 軸のモデルには図 1 のモデルを用いた。反対に、機械特性が無視できない Y 軸のモデルには HPC に 2 次系の振動要素を加えた図 2 のモデルを用いた。

3.2 位置ループゲインのチューニング

「輪郭運動誤差の測定 モデルの同定 シミュレーションによるゲイン選択」のサイクルを繰り返す。なお今回のチューニングにおいては位置ループゲイン K_p の上限を 75 と設定した。輪郭運動誤差を測定するツールパスを図 3 に示す。送り速度は 3000mm/min とした。

輪郭運動誤差はコーナ部のオーバーシュートやアンダーシュートによって生じる。したがってコーナ部での軌跡誤差 (Y 軸方向に評価) と直線部に移ったときの軌跡誤差 (X 軸から 45 度方向に評価) のそれぞれの最大値で評価した。以下にチューニング手順と結果を示す。

Step1: 位置ループゲイン K_p を標準値の 33 に設定し、機械を運転して、運動軌跡の測定を行った。測定した運動軌跡を用いて Y 軸機械モデルの固有振動数 と減衰率 を同定した。その結果 $\omega_n = 1630(\text{rad/s})$, $\zeta = 0.5(-)$ となった。

同定したモデルを用いて位置ループゲイン K_p を変化させたときの運動軌跡をシミュレートすると、さらにゲインを上げれば輪郭運動誤差が減少するということがわかった。そこで位置ループゲイン $K_p=51$ と設定して、機械を運転して、運動軌跡の測定を行った。

図 4 に位置ループゲイン $K_p=33$ と 51 のときの、運動軌跡のシミュレーション結果と実測結果を示す。輪郭運動誤差は、位置ループゲイン $K_p=33$ の時はコーナ部で $3\mu\text{m}$ 、直線部で $20\mu\text{m}$ 、位置ループゲイン $K_p=51$ の時はコーナ

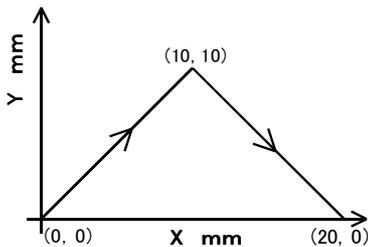


Fig. 3 Reference trajectory

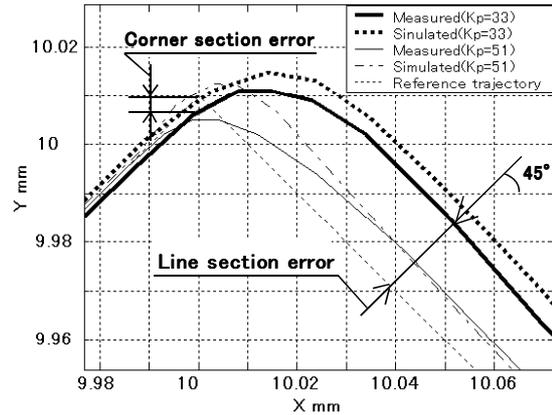


Fig. 4 Comparison of motion trajectories

部で $5\mu\text{m}$ 、直線部で $7\mu\text{m}$ となった。シミュレーション誤差 (実測とシミュレーションの差) は、位置ループゲイン $K_p=33$ の時はコーナ部で $4\mu\text{m}$ 、直線部で $4\mu\text{m}$ 、位置ループゲイン $K_p=51$ の時はコーナ部で $7\mu\text{m}$ 、直線部で $2\mu\text{m}$ となった。

Step2: 位置ループゲイン $K_p=51$ での運動軌跡の実測値を用いて と の同定を行った。しかし、シミュレーション誤差を $5\mu\text{m}$ 以内にできる と を同定することができなかった。そこで、 の代わりに、位置ループゲイン補正係数 を乗じ、 と を同定した結果、 $\omega_n = 0.575$, $\zeta = 0.83$ となった。このモデルを用いた場合、シミュレーション誤差は、コーナ部で $1\mu\text{m}$ 、直線部で $1\mu\text{m}$ となった。このモデルを用いて位置ループゲイン K_p を変化させたときの軌跡をシミュレートした結果、さらにゲインを上げれば輪郭運動誤差が減少するという結果となった。

Step3: 位置ループゲイン $K_p=75$ に設定して機械を運転して運動誤差を測定した結果、輪郭運動誤差はコーナ部で $7\mu\text{m}$ 、直線部で $5\mu\text{m}$ に減少した。位置ループゲイン K_p は上限値に達したので、ここでチューニングを終了した。

4. 結論

運動誤差軌跡の測定と簡易モデルを用いたサーボパラメータのチューニングを学習的に繰り返すことによって、能率よく制御ゲインの最適値を探索する方法を実機で検証した。モデルとその同定に問題点は残るが、モデルを使用しない場合に比べて輪郭運動誤差は能率よく低減できることがわかった。

参考文献

- 1) 例えば、垣野義昭ら：NC 工作機械における送り駆動系のトータルチューニングに関する研究 (第 4 報) - 多軸チューニング - , 精密工学会誌, Vol.63, No.3 (1997), pp.368-372 .
- 2) 竹下虎男ら：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.