전력전자학술대회 논문집 1997. 7. 17-19 전력전자학회

공작기계의 이송계 제어 시스템의 최적화

박인준, 곽경남* 백형래**
* 화천기공(주) ** 조선 대학교

Optimization of Motion Control System on the Machine Tool

I. J. Park, K. N. Kwak* H. L. Beak**
*Hwacheon Machine Tool Co. LTD **Chosun University

ABSTRACT : This paper is a study about motor technic of motion and feedforward control in order to shape cutting control on the machine tool. The shape error caused by delay of the servo system in the direction of radius at the time of circular cutting is reduced by feedforward control, shape error generated by the position command delay is minimized by using the acceleration/deceleration time constant after the interpolation. The study was verified to optimization of motion control on experiments of a vertical machining center of the machine tool.

1. 서 론

최근 공작기계의 고속 고정밀 고강성에 관한 기술 발전으로 복잡한 형상 가공을 고속으로 실현하기 위한 연구가 이루어지고 있으며 이중 중요한 기술의 하나가 형상 가공을 위한 CNC (Computerized Numerical Control)기술과 이송계 제어 기술이라 하겠다.

이송계 제어기술 중 가감속 시간이 형상 가공에 영향을 미치기 때문에 그 동안 지수형,직선형 및 벨형등 가감속 형태의 연구되어 왔고 서보계의 가감속 패턴과 서보 파라메터의 최적선정으로 서보계의 추종오차를 최소화 하여 형상 가공 제어에 중요한 부분으로 인식 되고 있다. 본 논문에서는 형상 가공 제어를 위한 이송계 Motor의 최적 선정기술과 Feedforward 제어를 적용형상오차를 최소화 하였다.

2. 이송계 Motor 최적 선정

Motor의 선정에는 급이송속도, 가속도, 부하조건 등에 따라 사용가능한 Motor를 선정한다. Motor에 걸리는 부하는 마찰 등의 부하 Torque와 부하 Inertia의 2종류가 있다. Motor의 선정에는 그부하를 정확히 계산하고 이 계산치가 아래 선정 조건에 만족하는 것이 좋다.

2-1. MOTOR TORQUE

기계 무부하 이송시 Torque 가 Motor 연속 정격 Torque의 적정 용량을 선정해야한다. 정지시 또는 극저속시에 마찰계수가 커서 Torque가 증가하고 정격 Torque를 초과할 경우에는 정지시에 흐르는 전류에 의해 Motor Overheat 하여 파손됩니다. 역 점성 등의 영향으로 고속시 Torque가 증대하고 정격 Torque를 초과한 경우에는 충분한 가속 Torque 취하지 않고 가속 시정수를 극단에 길게하지 않으면 안된다.1

Motor Torque는 (1)식과 같이 나타내며

$$Tm = Tl + Ta \quad (1)$$

여기서

Tm : Motor torque (kgf · cm)
Tl : 부하 torque (kgf · cm)
Ta : 가속 torque (kgf · cm)

부하 Torque는 (2)식과 같다.

$$Tl = \frac{F \cdot L}{2\pi\eta} + Tf \quad (2)$$

여기서

Tl : Motor 축환산 부하 Torque (Nm)

F : 가동부 (Table 및 공구대등)을 2축 방향으로 움직이는데 필요한 힘 (kgf)

Motor 1회전당 기계 이동량은 기어비를 곱해서 식(3)과 같이 나타낸다.

$$L = P \times \left(\frac{Z_1}{Z_2}\right) \quad (3)$$

단, Tf는 Ball screw nut부, bearing 부의 Motor 축환산 마찰 Torque이다.

가동부르 2축 방향으로 움직이는 힘을 절삭시와 비절삭시는 식(4),(5)와 같이 나타내며

$$F = \mu \ (\ w + fg \ ) \quad (4)$$

$$F = Fc + \mu \ (W+fg+Fcf) \quad (5)$$

μ : 습동면의 마찰계수
W : 가동물 중량 (Table, Work) (kgf)
fg : GIB 체결력 (kgf)
Fc : 절삭력에 의한 Slide 반력 (kgf)
Fcf : 습동면에 눌러지는 힘 (kgf)

가속 Torque (Ta)는 식(6)과 같이 나타낸다.

$$Ta = \frac{Vm}{60} \times 2\pi \times \frac{1}{ta} \times Jm \times (1 - e^{-ks \cdot ta}) + \frac{Vm}{60} \times 2\pi \times \frac{1}{ta} \times JL \times (1 - e^{-ks \cdot ta}) \div \eta \quad (6)$$

Vm : 급이송시 Motor 회전수 (min^{-1})
ta : 가속시간 (sec)
JM : Motor Inertia ($kgf \cdot cm \cdot s^2$)
JL : 부하 Inertia ($kgf \cdot cm \cdot s^2$)
Ks : Servo Position Loop Gain(sec^{-1})
η : 기계효율

2-2. 시정수(TIME CONSTANT)

회망하는 시정수에 가속이 가능하고 일반적으로 감속시에는 부하 Torque가 감속을 돕는 쪽으로 일하기 때문에 가속하고 동일 시정수로 감속 가능하다. 가속 Torque을 계산하고 가속에 필요한 Torque가 Motor의 단속 동작 영역내 Torque로 되도록 한다.

2-3. 급이송 위치 결정 빈도

급이송 위치 결정 빈도가 회망치에 되게하고 급이송 위치결정 빈도가 크게 되면 전체의 동작시간에 대한 가속시간의 점유율이 크고 Overheat하여 파손된다. 같은 급이송 속도 위치결정 빈도에서도 가감속 시정수를 길게하면 발열은 반비례하여 적어진다.

2-4. Torque의 2승 평균치

부하조건이 1Cycle 중 여러 가지 변할 경우에는 Torque의 2승 평균치는 식(7)과 같이 나타내며 정격 Torque에 내에 있도록 한다.

$$Trms = \sqrt{\frac{(Ta+Tm)^2 t_1 + Tm^2 t_2}{t_0} + \frac{(Ta-Tm)^2 t_1 + T_0{}^2 t_3}{t_0}} \quad (7)$$

2-5. 최대 절삭 Torque

최대 절삭 Torque을 걸어 이송 가능한 시간 (Duty Persent 와 "ON" 시간)이 회망치내 있게 한다.

3. 형상 제어 이론

3-1. Feed back control

1) Block diagram

Feed back control의 Block diagram은 그림1과 같이 간단히 나타낼 수 있다

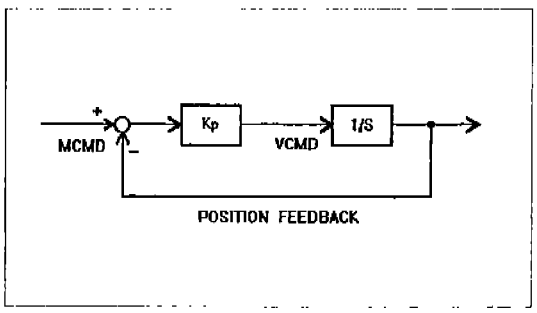

Fig 1. Block diagram of position loop control

2) Position error

위치 편차량은 식(8)과 같이 나타낸다.

$$\varepsilon = \frac{V}{A \times PG} \quad (8)$$

V : 이송 속도(mm/sec)

PG : Position loop gain($\frac{1}{s}$)

A : 최소 검출단위(mm)

3) Load Inertia Ratio (LDIT)

기계 부하Inertia와 Motor Inertia비는 식(8)과 같이 나타낸다.

$$\text{Load Inertia Ratio} = 256 \times \frac{Jl}{Jm} \quad (9)$$

Jl: Machine load inertia

Jm: Motor rotor inertia

이 설정치는 속도 Loop gain를 (1+LDIT/256)배에 상당한다.

4) Shape Cutting Error Radius

원호 절삭시 발생하는 형상 오차는 식(10)과 같이 나타낸다.

$$\Delta R = \Delta R_1 + \Delta R_2 \quad (10)$$

ΔR1 : Servo Loop 지연에 의한 Error

ΔR2 : Time Constant 에 의한 Error

(1) Feed Back(EXP.T.C.)

Feed Back제어의 지수형 시정수를 적용시 ΔR1,ΔR2는 식(11)과(12)와 같이 나타낸다.

$$\Delta R_1 = \frac{1}{2R} \times \frac{V^2}{Kp^2} \quad (11)$$

$$\Delta R_2 = \frac{1}{2R} \times T_1^{\,2} V^2 \quad (12)$$

(2) Feed Back(보간후 Linear T.C.)

Feed Back제어의 보간후 직선형 시정수를 적용시 ΔR1,ΔR2는 식(13)과 같이 나타낸다.

$$\Delta R_1 = \frac{1}{2R} \times \frac{V^2}{Kp}$$

$$\Delta R_2 = \frac{1}{24R} \times T_1^{\,2} V^2 \quad (13)$$

3-2. Feed forward control

1) Block diagram

Feed forward control의 Block diagram은 그림1과 같이 간단히 나타낼 수 있다

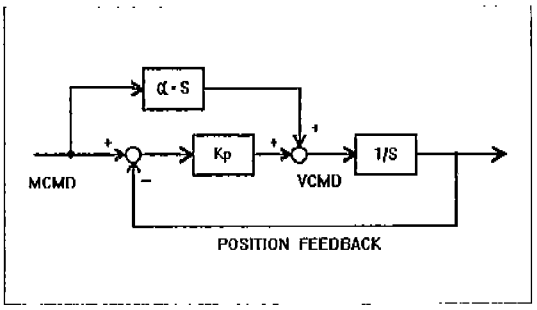

Fig 2. Block diagram of feed forward control

2) Shape cutting error radius

(1) Feed forward (Exp.T.C.)

Feed forward제어의 지수형 시정수를 적용시 ΔR1,ΔR2는 식(14)와 같이 나타낸다.

$$\Delta R_1 = (1-\alpha^2) \frac{1}{2R} \times \frac{V^2}{Kp^2}$$

$$\Delta R_2 = \frac{1}{2R} \times T_1^{\,2} V^2 \quad (14)$$

(2) Feed Forward (보간후 Linear T.C.)

Feed Forward제어의 보간후 직선형 시정수를 적용시 ΔR1,ΔR2는 식(15)와 같이 나타낸다.

$$\Delta R_1 = (1-\alpha^2) \frac{1}{2R} \times \frac{V^2}{Kp^2}$$

$$\Delta R_2 = \frac{1}{24R} \times T_1^{\,2} V^2 \quad (15)$$

V : Feedrate (mm/s)

Kp : Position Gain (s^{-1})

R : Radius (mm)

α : Feed Forward Value

T_1 : Time Constant(sec)

4. 실 험

4-1. Feed forward control의 이론치

형상 오차 수식(15)에 의해 계산하면 표1과 같이 나타낼 수 있다.

표 1. 이론 계산치

비교	번호	Radius (mm)	Speed (mm/min)	FF계수 α	$\Delta R(\Delta R1 + \Delta R2)$ (μm)
1	1	50	1000	0	0.004
	2	50	2000	0	0.019
	3	50	4000	0	0.077
2	1	50	1000	0	0.004
	4	50	1000	0.5	0.004
	6	50	1000	0.95	0.002
3	5	25	1000	0.95	0.004
	6	50	1000	0.95	0.002
	7	100	1000	0.95	0.001
4	8	25	4000	0.95	0.065
	9	50	4000	0.95	0.032
	10	100	4000	0.95	0.016

4-2. Feed forward control의 실험치

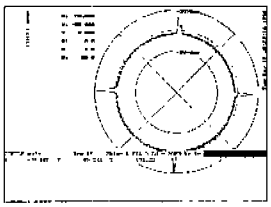

그림 1.

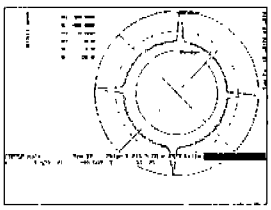

그림 2.

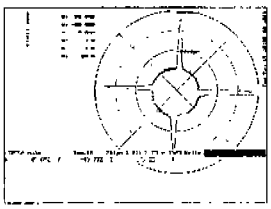

그림 3.

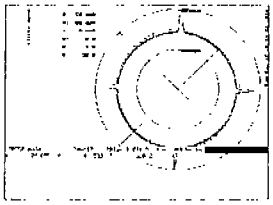

그림 4.

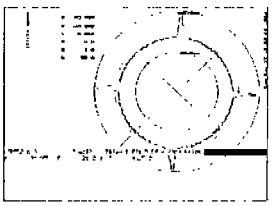

그림 5.

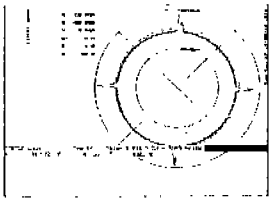

그림 6.

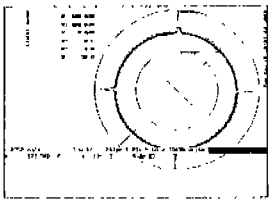

그림 7.

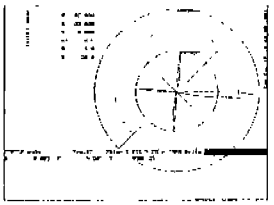

그림 8.

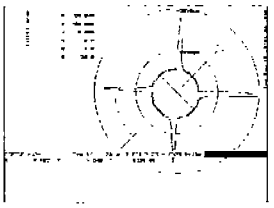

그림 9.

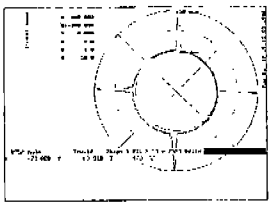

그림 10.

실험 결과치를 측정하면 표2와 같이 나타낼 수 있다. 이론치와 실험치 형상 오차⊿R 값이 유사한 것을 알 수 있다.

표 2. 실험의 결과표

비교	그림 번호	Radius (mm)	Speed (mm/ min)	FF계수 α	⊿R(⊿R1+ ⊿R2) (μm)
1	1	50	1000	0	0.004
	2	50	2000	0	0.012
	3	50	4000	0	0.038
2	1	50	1000	0	0.004
	4	50	1000	0.5	0.004
	6	50	1000	0.95	0.003
3	5	25	1000	0.95	0.006
	6	50	1000	0.95	0.004
	7	100	1000	0.95	0.003
4	8	25	4000	0.95	0.060
	9	50	4000	0.95	0.039
	10	100	4000	0.95	0.020

5. 결론

공작기계의 고속 고정도 고강성에 관한 기술 발전으로 복잡한 형상 가공을 고속으로 실현하기 위한 연구 중 중요한 기술의 하나가 형상 가공을 위한 Feedforward제어를 공작기계 이송계에 적용하였으며 본 연구는 형상 가공 제어를 위한 이송계 Motor 최적 선정 기술과 Feedforward 제어를 적용 형상 오차의 최소화를 실현 시키므로 고속 고정도 공작기계 이송계를 개발할 수 있었다.

[참 고 문 헌]

[1] FANUC AC SERVO AMPLIFIER MANUAL B-65005E/07, pp2-77

[2] FANUC AC SERVO MOTOR MANUAL B-65150E/02, pp71

[3] 화천기공(주), "가감속 알고리듬 개발" CNC 제어 및 서보/스핀들 드라이브 제어 Algorithm 개발 기술개발에 관한 연구 보고서, 통산 산업부, pp.213~248, 1996.10.31

[4] Stanley M. Shinners "Modern control system theory and application", pp152

[5] 이 봉진 "공작 기계 강의"