論文 한국정밀공학회지 제14권 제9호 (1997년 9월)
Journal of the Korean Society of Precision Engineering Vol. 14. No. 9. September. 1997.

서보모터의 가감속을 위한 직선형, 지수형 및 벨형 이산필터 설계

신 동 수*, 정 성 종**

Design of Linear, Exponential and Bell Type Discrete Filters for Acceleration and Deceleration of Servo Motors

Dong-Soo Shin*, Sung-Chong Chung**

ABSTRACT

This paper proposes the effective method of the software based motion control by using linear, exponential and bell type discrete filters for acceleration and deceleration of servo motors. Recursive filters are designed in discrete time domain which can reduce computation time and vibration of motors due to load disturbance. Also it deals with the method which decides the time constants of filters when a machine tool is driven at rapid, cutting and jog feedrate. Validity of the proposed method is verified by corner cutting experiments.

Key Words: Rapid Feedrate (급속이송), Cutting Feedrate (절삭이송), Jog Feedrate (조그이송), Motion Control (운동제어), Acceleration and Deceleration (가감속), Linear Type (직선형), Exponential Type (지수형), Bell Type (벨형), Z Transform (Z 변환), Corner Cutting (코너가공)

1. 서 론

공작기계, 반도체 제조장비, 자동검색기 등과 같은 서보시스템에서는 고속 · 고정도 위치제어특성과 운동제어 특성이 요구된다.[1-6] 공작기계의 경우 그 성능은 이송계의 제어방식에 좌우되며, 이제까지 많은 연구가 수행되어 왔다.[2-6] 서보모터의 제어기술은 하드웨어 방식에서 소프트웨어 방식으로 변화하고 있으나 산업계에서 이용되는 수치제어장치들의 위치제어 방식은 대부분 펄스열로서 위치제어명령을 주는 하드웨어 방식이 이용되고 있다.

하드웨어 방식은 부하변동에 신속하게 대응하지 못하며, 마이크로프로세서의 처리능력 한계때문에 모터구동시 가속과 등속 사이 또는 등속과 감속 사이에서 속도의 변곡이 발생하게 된다. 따라서 부하변동에 의한 진동과 소음이 야기된다.[7]

또한, 서보모터 구동시의 부하변동과 서보모터의 가감속 패턴을 어떤 형태로 하느냐에 따른 공작기계의 운동상태에 대한 연구가 이루어지고 있으며,[2,6,8] 모터의 가감속

* 화천기공(주) 기술개발 연구소, 정회원
** 한양대 기계공학부, 정회원

형태가 형상오차에 미치는 영향이 크다는 연구도 있다.[8]

서보시스템의 소프트웨어를 이용한 디지털제어에 관한 연구를 살펴보면, Tomizuka[1,2] 의 경우 제안한 ZPETC (Zero Phase Error Tracking Control) 를 이용한 Feedforward 제어법을 연구한 바 있으며, Koren 등[6] 은 서보시스템의 경로를 PTP (Point To Point) 와 CP (Continuous Path) 형태로 구분하여 추종오차 성분을 제거하기 위한 CCC (Cross Coupling Control) 라는 진보된 제어기를 설계하는 알고리듬을 제안한 바 있다. Weck 등[4,5] 은 IKF (Inverse Compensation Filter) 를 이용하여 경로오차 보상 (Path Error Compensation) 을 시도한 바 있다. 이와같이 서보시스템의 소프트웨어 제어방식은 모터에 부착된 부하에 따라 적절히 대응할 수 있으며, 가감속 시정수의 조절범위도 크기 때문에 미세운동제어가 가능하다는 장점을 가지고 있다.

본 논문에서는 마이크로프로세서를 이용하여 서보시스템의 위치제어시 이산 시간 상태방정식으로 표현되는 Recursive 필터를 이용한 지수형 (Exponential Type), 직선형 (Linear Type) 및 벨형 (Bell Type) 가감속 (Acceleration and Deceleration) 알고리듬을 구축하였고, 그를 이용한 소프트웨어 제어방식에 대하여 연구하였다. 공작기계의 급속이송, 절삭이송 및 조그이송에서 지수형, 직선형 및 벨형의 가감속 패턴을 이용하는 경우 부하변동에 따른 시정수를 효과적으로 결정하였으며, 코너가공 패턴을 통해 제시한 방법의 타당성을 입증하였다.

2. 기존 가감속 회로의 동작원리 및 해석

2.1 동작원리[7]

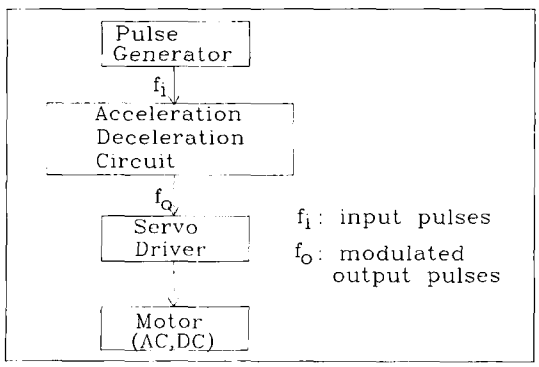

Fig. 1 Position control system (input value : pulse train).

Fig. 1 은 위치명령이 펄스열 입력으로 주어지는 일반적인 위치제어 시스템을 보인 것이다. 여기서 위치는 발생된 펄스수로 제어되고, 속도는 발생된 펄스의 주파수로 제어되며, 위치제어는 하드웨어에 의해 실현된다.

Fig. 2 는 Fig. 1 에 나타낸 위치제어 시스템 중 지수형 가감속 회로의 동작원리를 나타낸다. 입력펄스 f_i가 도달할 때마다 업 / 다운 카운터 (Up / Down Counter) 의 내용을 증가시키고 덧셈명령 펄스 (Addition Command Pulse) 가 발생할 때마다 업 / 다운 카운터의 내용 x 와 누산기 (Accumulator) 의 내용 y를 더해서 누산기에 입력한다. 이때 누산기에서 용량초과 (Overflow) 가 발생되면 업 / 다운 카운터를 용량초과된 펄스수 만큼 감소시키고 용량 초과된 펄스를 출력 f_o 로 내보낸다.

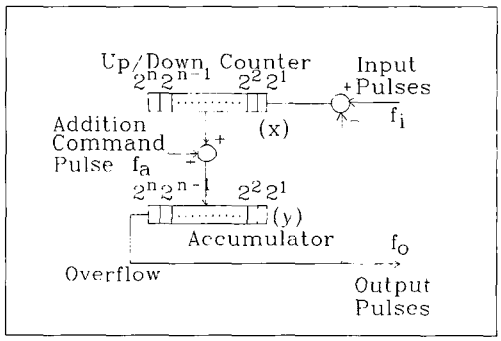

Fig. 2 Principle of exponential acceleration and deceleration circuit.

2.2 가감속 회로의 모델링

입력펄스 f_i 의 주파수 값을 f_c 라 하면

$$f_i = \begin{cases} f_c & (0 \le t \le t_d) \\ 0 & (t > t_d) \end{cases} \qquad (1)$$

로 표시된다. 여기서 t_d 는 입력펄스 f_i 가 정지하는 순간의 시간이다.

미소시간 Δt 동안 업 / 다운 카운터에 입력된 펄스수 Δx 는 식 (2) 로 표시된다.

$$\Delta x = (f_i - f_0) \cdot \Delta t \qquad (2)$$

Δt 동안 누산기에 쌓이는 펄스수 Δy 는 Δt동안에 발생한 덧셈 명령 펄스수 ($f_a \cdot \Delta t$) 만큼 업 / 다운 카운터 현재값 x를 더하면 되므로 식 (3) 과 같이 표시된다.

$$\Delta y = x \cdot f_a \cdot \Delta t \tag{3}$$

또한, 미소시간 Δt동안 누산기에서 용량초과된 펄스수는 $f_o \cdot \Delta t$및 $\frac{y}{2^n}$로 표시되므로 식 (4) 가 성립하게 된다.

$$f_o \cdot \Delta t = \frac{y}{2^n} \tag{4}$$

$t = 0$에서 업 / 다운 카운터의 값 x및 누산기의 값 y는 모두 0 이므로 초기조건은 식 (5) 가 된다.

$$x(0) = y(0) = 0 \tag{5}$$

2.3 가감속 회로의 지수함수 성질에 대한 분석

식 (2) ~ (5) 중$\triangle x \fallingdotseq dx$, $\triangle y \fallingdotseq dy$, $\triangle t \fallingdotseq dt$로 근사화시키면,

$$dx = (f_i - f_o) \cdot dt \tag{6}$$
$$dy = x \cdot f_a \cdot dt \tag{7}$$
$$f_o \cdot dt = \frac{dy}{2^n} \tag{8}$$
$$x(0) = y(0) = 0 \tag{9}$$

〈1〉 $0 \le t \le t_d$인 경우 (즉 $f_i = f_c$일 때)

식 (9) 는 Laplace 변환의 초기조건이 되며, 식 (6) ~ (8) 을 Laplace 변환하면,

$$sX(s) - x(0) = \frac{f_c}{s} - F_o(s) \tag{10}$$
$$sY(s) - y(0) = f_a \cdot X(s) \tag{11}$$
$$F_o(s) = \frac{1}{2^n} \cdot (sY(s) - y(0)) \tag{12}$$

이 되고, 식 (11) 을 식 (12) 에 대입하면 식 (13) 이 된다.

$$F_o(s) = \frac{1}{2^n} \cdot f_a \cdot X(s) \tag{13}$$

또한, 식 (10) 을 식 (13) 에 대입하여 정리하면 식 (14) 가 된다.

$$F_o(s) = \frac{f_c}{s} - \frac{f_c}{(s + \frac{f_a}{2^n})} \tag{14}$$

식 (14) 를 Laplace 역변환하면 식 (15) 와 같이 표현된다.

$$f_o(t) = f_c \cdot (1 - e^{(-f_a \cdot \frac{t}{2^n})}) \tag{15}$$

여기서, $\tau = \frac{2^n}{f_a}$라 하면 식 (15) 는 식 (16) 과 같이 된다.

$$f_o(t) = f_c \cdot (1 - e^{\frac{-t}{\tau}}) \tag{16}$$

즉, $0 \le t \le t_d$에서 출력펄스f_0는 시정수 τ를 갖는 지수함수로 가속됨을 알 수 있다. 가속기의 기울기는 누산기 비트수 n에 비례하고 덧셈 명령펄스의 주파수에 반비례함을 알 수 있다.

〈2〉 $t > t_d$인 경우 (즉 $f_i = 0$일 때)

식 (13) 을 $X(s)$에 대하여 표현하면,

$$X(s) = \frac{2^n \cdot F_o(s)}{f_a} \tag{17}$$

가 되고, $t = t_d$, $f_i = 0$일 때 식 (6) 을 Laplace 변환하여 정리하면 식 (18) 이 된다. 식 (18) 에 식 (17) 을 대입하고 정리하면 식 (19) 가 된다. 여기서 $F_i(s) = 0$, $t = t_a$이다.

$$sX(s) - x(t_a) = F_i(s) - F_o(s) \tag{18}$$
$$X(s) = \frac{1}{s}(\frac{2^n}{f_a} \cdot f_o(t_d) - F_o(s))$$
$$F_o(s) = \frac{1}{s + \frac{f_a}{2^n}} \cdot f_o(t_d) \tag{19}$$

식 (19) 를 Laplace 역변환하기 위해 매개변수 $t^* = t - t_d$을 도입하면 식 (20) 으로 표현된다.

$$f_o(t^*) = f_o(t_d) \cdot e^{\frac{-t^*}{\tau}} \tag{20}$$

식 (16) 에서 $f_o(t_d) = f_c(1 - e^{\frac{-t_d}{\tau}})$ 이므로, 식 (20) 은

$$f_o(t) = f_c \cdot (1 - e^{\frac{-t_d}{\tau}}) \cdot e^{-\frac{(t - t_d)}{\tau}} \tag{21}$$

이 된다. 여기서는 $\tau = \frac{2^n}{f_a}$ 이며, 출력펄스 f_o 는 시정수 τ 를 갖는 지수함수로 감속됨을 알 수 있다.

3. 이산형 가감속기 설계

3.1 지수형 가감속기

식 (16) 과 (21) 의 지수함수를 그대로 사용할 수도 있으나, 마이크로프로세서상에서 지수함수는 매 샘플링 시간마다 계산해야 하기 때문에 계산시간이 길어지게 되어 위치제어 시스템이 불안정해지며 위치경로의 정도가 떨어지는 단점이 있다. 또한 복수개의 서보모터의 동시제어는 불가능하게 된다. 따라서 2 절에서 분석한 하드웨어 모델로부터 지수형 가감속을 이산시간 상태방정식으로 수식화 한다.

디셈 명령 펄스 주파수는 위치경로를 구하기 위한 샘플링시간 T 로 표시된다.

즉 $f_a = \frac{1}{T}$ 로 표시되며, 임의의 시점 k에서 샘플링시간 T 동안 가감속 회로에 입력되는 펄스수는 $f_i(k)$로 표현되므로 $\hat{x}(k)$를 임의의 k 시점에서 업 / 다운 카운터의 값이라 하면 식 (22) 가 된다.

$$\hat{x}(k) = x(k-1) + f_i(k) \tag{22}$$

여기서, $k = 0, 1, 2, 3, \cdots\cdots$이고 $x(k-1)$ 은 $f_i(k)$ 펄스가 입력되기전의 업 / 다운 카운터의 값으로서 가감속 회로가 동작하여 $k-1$시점의 업 / 다운 카운터의 값을 나타낸다. 임의의 k시점에서 누산기로부터 용량초과되는 펄스수를 $p(k)$라 하면 식 (23) 이 된다.

$$p(k) = \frac{y(k)}{2^n} \tag{23}$$

임의의 시점 k에서 가감속 회로의 출력 $f_0(k)$는 식 (24) 로 표현되고, 임의의 k시점에서 업 / 다운 카운터의 값 $x(k)$는 식 (25) 가 되며, k시점에서 누산기에 남아있는 값 $y(k)$는 식 (26) 과 같다.

$$f_o(k) = p(k) - p(k-1) \tag{24}$$
$$x(k) = \hat{x}(k) - f_o(k) \tag{25}$$
$$y(k) = y(k-1) + \hat{x}(k) \tag{26}$$

초기조건은 $x(-1) = y(-1) = 0$ 이다. 식 (22) ~ (26) 을 Z변환하면,

$$\hat{x}(z) = \frac{x(z)}{z} + f_i(z) \tag{27}$$
$$y(z) = \frac{y(z)}{z} + x(z) \tag{28}$$
$$p(z) = \frac{y(z)}{2^n} \tag{29}$$
$$f_o(z) = p(z) - \frac{p(z)}{z} \tag{30}$$
$$x(z) = \hat{x}(z) - f_o(z) \tag{31}$$

이 된다. 여기서 식 (28) 과 (29) 를 이용하여 식 (30) 을 식 (32) 로 표현할 수 있고, 식 (31) 은 식 (27) 을 이용하여 식 (33) 으로 나타낼 수 있다.

$$f_o(z) = \frac{\hat{x}(z)}{2^n} \tag{32}$$
$$\hat{x}(z) = \frac{z}{z-1} \cdot f_i(z) - \frac{f_o(z)}{z-1} \tag{33}$$

식 (32) 와 식 (33) 을 이용하면, 식 (34) 가 얻어지고, 여기서 n은 누산기의 비트수이다. 또한, Z역변환하면 식 (35) 와 같이 표현된다.

$$f_o(z) = \frac{f_o(z)}{z} + \frac{[f_i(z) - \frac{f_o(z)}{z}]}{2^n} \tag{34}$$
$$f_o(k) = f_o(k-1) + \frac{[f_i(k) - f_o(k-1)}{2^n} \tag{35}$$

식 (35) 에서 샘플링시간 T는 타이머에 의해 CPU 에 인터럽트를 주기적으로 걸어주는 시간으로서 일정하다고 볼 수 있기 때문에 가감속 기울기는 n값으로 결정된다. 하드웨어 상의 n은 자연수로 2^n은 1, 2, 4, 8, …… 이지만, 소프트웨어 상의 n 은 2^n자체를 실수로 할 수 있기 때문에 시정수를 미세하게 조정할 수 있다. 식 (35) 를 Recursive 형으로 표현하면 식 (36) 과 같은 가속 알고리듬이 얻어진다.

$$\begin{aligned}
&For\ \ k = 0\ \ to\ \ N \\
&f_i(k) = u(k)\ \ :\ \ step\ \ input \\
&f_o(k) = f_o(k-1) + Gain \cdot [f_i(k) - f_o(k-1)] \\
&f_o(k-1) = f_o(k) \\
&Next\ \ k
\end{aligned} \tag{36}$$

여기서 N은 목표위치까지의 입력되는 펄스수이며, *Gain*은 원하는 경사 변화율을 나타낸다.

Fig. 3 은 *Gain* 값에 따른 지수형 가감속 실현을 위한 선도를 나타내고 있다. *Gain* 값은 소프트웨어적으로 더블(Double) 형태를 사용하기 때문에 미세한 부분까지 조정이 가능하며, 게인값으로 인한 지수형 가감속 형태를 나타내고 있고, 1 *m*/min 으로 절삭이송 중인 z 축 서보모터의 시간에 따른 속도 실험데이터를 오른쪽 상단에 함께 보여주고 있다.

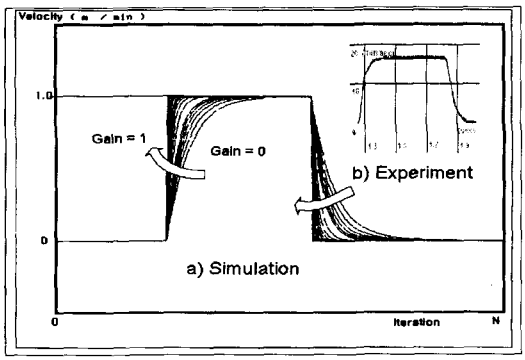

Fig. 3 Simulation and experimental results for exponential type recursive filter.

3.2 직선형 가감속기[7,8]

기존 연구에서는 단순화한 큐빅 스플라인 (Cubic Spline) 의 수식을 이용하여[9] 축에 대한 운동을 나타내고 있다. 그러나, 다축의 경우 계산시간의 고속화를 위하여 본 논문에서는 단순화된 이산시간 상태방정식을 제시하였다. 펄스열 입력을 통해 직선형 가감속을 실현할 경우 기계의 무리한 영향을 방지하기 위하여 실제 출력되는 값을 사다리꼴 형태로써 가속하게 된다. 이러한 직선형 가감속 실현은 직선보간 방법을 사용하여 구현되며, 이산시간 상태방정식의 형태로 표현된다.

시간 t_o와 t_k사이에 함수 $r(t)$가 $r(t_o)$, $r(t_1)$, $r(t_2)$, $\cdots, r(t_i), \cdots, r(t_k)$ 점들로 표현되어진다면 시간 $t_{i-1} \le t \le t_i$ 동안에 함수값은 $r(t_{i-1})$와 $r(t_i)$ 사이의 직선보간을 통하여 얻어진 식 (37) 과 같다.

$$r(t) = r(t_{i-1}) + [t - t_{i-1}] \cdot \frac{[r(t_i) - r(t_{i-1})]}{[t_i - t_{i-1}]} \qquad (37)$$

또한, 시간 간격을 T라 하면 식 (38) 로 t를 표현할 수 있다.

$$t = t_o + n \cdot V \cdot T \qquad (38)$$

여기서, $n = 0, 1, 2, 3, \cdots\cdots, N$가 되며, $N = \frac{(t_k - t_o)}{V \cdot T}$이며, V는 원하는 변화율을 나타낸다. 식 (37) 과 (38) 을 통하여 반복적인 수식 형태로 변환하면 식 (36) 과 유사한 가속 알고리듬 식 (39) 가 얻어진다.

$$\begin{aligned} &For\ \ k = 0\ \ to\ \ N \\ &f_i(k) = u(k)\ :\ step\ \ input \\ &f_o(k) = f_o(k-1) + Gain \cdot \frac{[f_i(k) - f_o(k-1)]}{Nmax} \qquad (39) \\ &f_o(k-1) = f_o(k) \\ &Next\ \ k \end{aligned}$$

여기서, N 은 목표위치까지의 입력되는 펄스수이고, *Gain, Nmax*는 원하는 경사의 변화율을 나타내며, Fig. 4 는 *Gain* 값에 따른 직선형 가감속 형태를 나타낸 것이고 오른쪽 상단은 30 *m*/min 으로 급속이송 중인 z 축 서보모터의 시간에 따른 속도 실험데이터를 보여주고 있다.

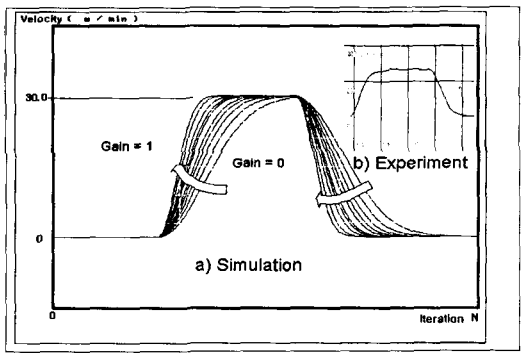

Fig. 4 Simulation and experimental results for linear type recursive filter.

3.3 벨형 가감속기

펄스열 입력을 통하여 벨형 가감속의 실현을 수행하기 위해 식 (36) 과 식 (39) 를 이용하면 벨형 가속은 식 (40) 으로 표현된다.

$$\begin{aligned} &For\ \ k = 0\ \ to\ \ N \\ &f_i(k) = u(k)\ :\ step\ \ input \end{aligned}$$

$$f_o(k) = f_o(k-1) + Gain \cdot \frac{[f_i(k) - f_o(k-1)]}{Nmax} \quad (40)$$

$f_i(k) = f_o(k)$

$f_o(k) = f_o(k-1) + Gain \cdot [f_i(k) - f_o(k-1)]$

$f_o(k-1) = f_o(k)$

Next k

Fig. 5 는 게인값에 따른 벨형 가감속 형태를 나타낸 것이며 오른쪽 상단은 30 *m*/min으로 급속이송 중인 z 축 서보모터의 시간에 따른 속도 실험데이터를 보여주고 있다.

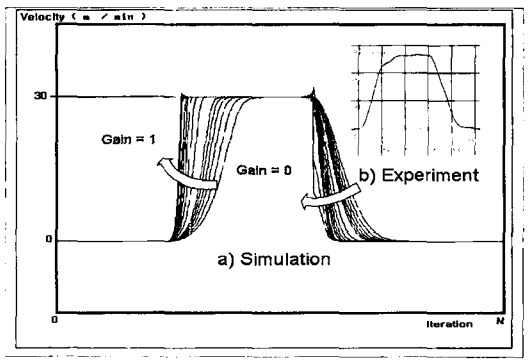

Fig. 5 Simulation and experimental results for bell type recursive filter.

4. 이송형태에 따른 가감속 실험

FANUC 0MC 가 장착된 화천기공(주)의 수직형 머시닝센터를 사용하여 가감속 실험을 수행하였다. 공작기계상의 서보모터 데이터를 채취하기 위해 인터페이스 카드를 컴퓨터의 프린트포트와 공작기계의 제어축카드에 연결한 상태가 실험을 위한 구성이다. 실험상의 영향인자는 관성비, 시정수, 가감속 형태, 이송속도의 4 가지 파라미터로 구분하여 살펴보았다. Table 1 은 실험조건을 보인 것이다.

Table 1 에서 관성비는 서보모터와 테이블 관성과의 비율을 나타낸 것으로 일반적으로 60 % 로 설정하고 급속이송, 절삭이송, 조그이송시 가감속 형태에 따른 시정수 값을 변화시켜 실험을 수행하였다.

Table 1. Experimental condition.

Type of Machine	Type of Feedrate	Axis	Type of Acceleration and Decelaration		Time Constant (msec) (a)	(b)	(c)
Vertical Machining Center (Inertia Ratio : 60%)	Rapid Feedrate	x, y, z	Linear	Fig. 6	40	55	70
		x, y	Bell	Fig. 7	20	25	35
		z			45	65	85
	Cutting Feedrate	x, y	Linear	Fig. 8	10	20	30
		z			20	30	40
		x,y	Exponential	Fig. 9	10	20	30
		z			20	30	40
	Jog Feedrate	x, y	Linear	Fig. 10	25	50	70
		z			20	40	60
		x, y	Exponential	Fig. 11	25	50	70
		z			20	40	60
	Corner Cutting	x, y, z	Conventional Linear	Fig. 12-(a)	15	15	15
		x, y, z	Proposed Linear	Fig. 12-(b)	30	30	30
		x, y, z	Conventional Exponential	Fig. 12-(c)	15	15	15
		x, y, z	Proposed Exponential	Fig. 12-(d)	30	30	30

4.1 급속이송에서 직선형 및 벨형 가감속 실험

공작기계상에서 가공 G 코드중 G00 을 이용하여 x, y 및 z 축에 대한 가감속 실험을 수행하였다. Fig. 6 은 가감속 형태가 직선형이며, 시정수는 40, 55, 70 *msec*및 이송속도 30 *m*/min 으로 3 축에 대한 속도 대비 시간 데이터를 채취한 것이다. Fig. 6 과 같이 시정수 40 ~ 55 상태에서는 z 축 성분에 진동영향이 보이며, 55 ~ 70 에서는 부하변동 현상이 현저히 감소하는 것을 볼 수 있다.

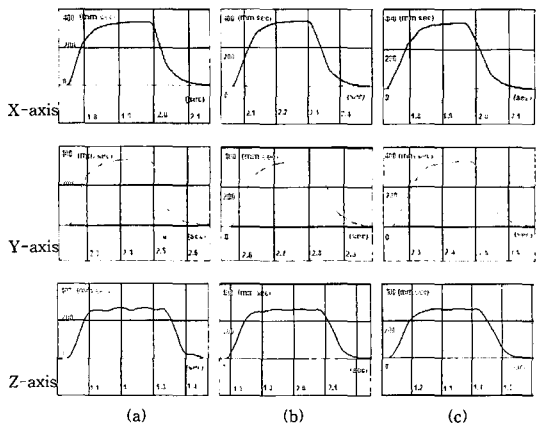

Fig. 6 Experimental results in rapid feedrate (Linear type).
(a) Feedrate : 30 m/min, and x = y = z = 40 msec.
(b) Feedrate : 30 m/min, and x = y = z = 55 msec.
(c) Feedrate : 30 m/min, and x = y = z = 70 msec.

Fig. 7 은 Table 1 과 같이 가감속 형태가 벨형이며, x 와 y 축 시정수는 20, 25, 35 *msec*, z 축 시정수가 45 ~ 85 msec 로 주어지는 경우 이송속도 30 *m*/min에서 3 축에 대한 실험을 수행한 것이다. 속도 변곡이 거의 없고 진동영향이 적은 시정수 x, y 는 35 이고 z 는 70 ~ 85 사이가 최적상태이다.

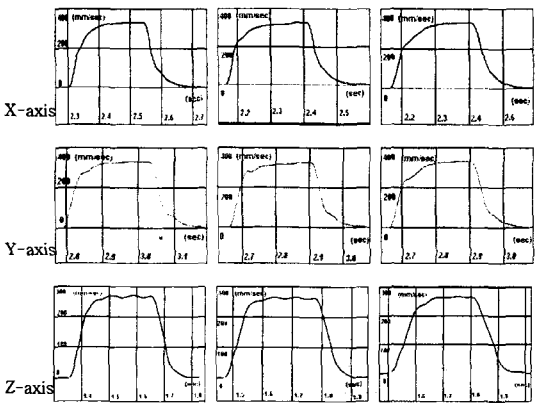

Fig. 7 Experimental results in rapid feedrate (Bell type).
(a) Feedrate : 30 m/min, x = y = 20 msec, and z = 45 msec.
(b) Feedrate : 30 m/min, x = y = 25 msec, and z = 65 msec.
(c) Feedrate : 30 m/min, x = y = 35 msec, and z = 85 msec.

4.2 절삭이송에서 직선형 및 지수형 가감속 실험

공작기계상에서 가공 G 코드인 G01 을 이용하여 x, y 및 z 축에 대한 가감속 실험을 수행하였다. Fig. 8 은 가감속 형태가 직선형이며, Table 1 과 같은 실험조건으로 데이터를 채취한 것이다. Fig. 8 - (a), (b) 의 형태가 (c) 에 비해 불연속적인 구간과 변동크기가 적기 때문에 더 안정적이다.

Fig. 9 는 Table 1 과 같이 가감속 형태가 지수형이며, Table 1 의 실험조건으로 수행한 것이다. Fig. 9 - (b) 경우가 최적인 상태임을 알 수 있다.

4.3 조그이송에서 직선형 및 지수형 가감속 실험

공작기계상에서 조그모드 (Jog Mode) 를 이용하여 x, y 및 z 축에 대한 가감속 실험을 수행하였다. Fig. 10 는 Table 1 과 같이 가감속 형태가 직선형이며, 그때의 데이터를 채취한 것이다. 기계에 무리한 영향이 없고 진동이 없는 시정수 x, y 는 60 ~ 70 사이 그리고 z 는 40 ~ 50 사이 값이 최적이다.

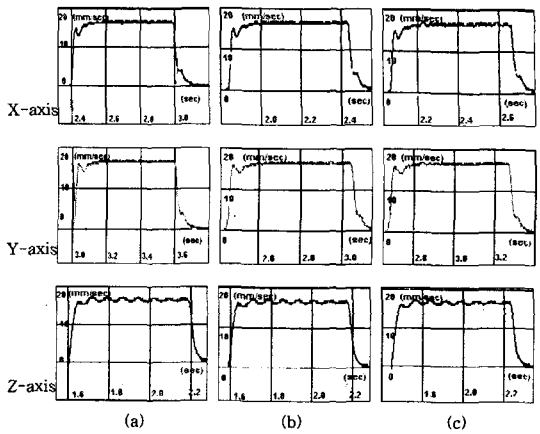

Fig. 8 Experimental results in cutting feedrate (Linear type).
(a) Feedrate : 1 m/min, x = y = 10 msec, and z = 20 msec.
(b) Feedrate : 1 m/min, x = y = 20 msec, and z = 30 msec.
(c) Feedrate : 1 m/min, x = y = 30 msec, and z = 40 msec.

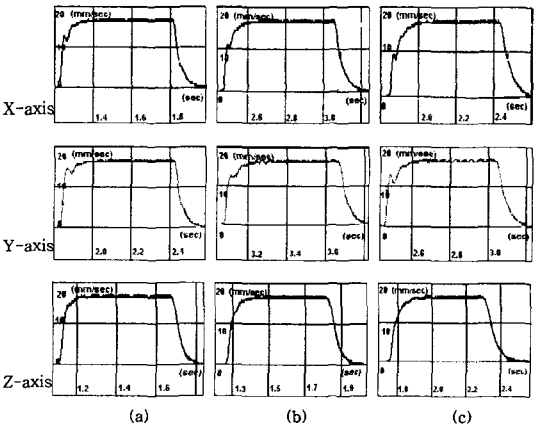

Fig. 9 Experimental results in cutting feedrate (Exponential type).
(a) Feedrate : 1 m/min, x = y = 10 msec, and z = 20 msec.
(b) Feedrate : 1 m/min, x = y = 20 msec, and z = 30 msec.
(c) Feedrate : 1 m/min, x = y = 30 msec, and z = 40 msec.

Fig. 11 은 Table 1 과 같이 가감속 형태가 지수형이며, 그때의 실험조건으로 수행한 것이다. 기계에 무리한 영향이 없고 진동이 없는 시정수 x, y 는 50 ~ 70, z 는 40 ~ 60 사이 값이 최적값이다.

4.4 코너가공 실험

이산필터에서의 게인값 조절 및 실험에서의 적절한 시정수의 선택효과를 살펴보기 위해 공작기계상에서 가공

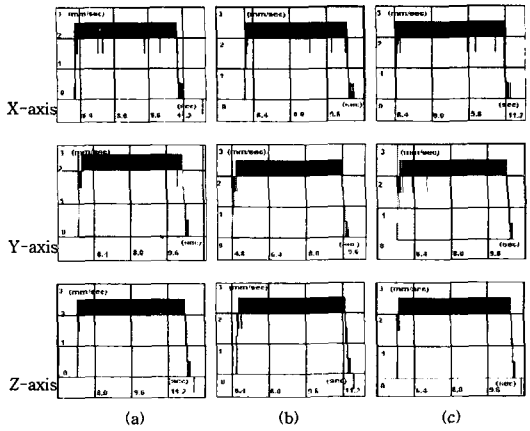

Fig. 10 Experimental results in jog feedrate (Linear type).
(a) Feedrate : 0.75 m/min, x = y = 25 msec, and z = 20 msec.
(b) Feedrate : 0.75 m/min, x = y = 50 msec, and z = 40 msec.
(c) Feedrate : 0.75 m/min, x = y = 70 msec, and z = 60 msec.

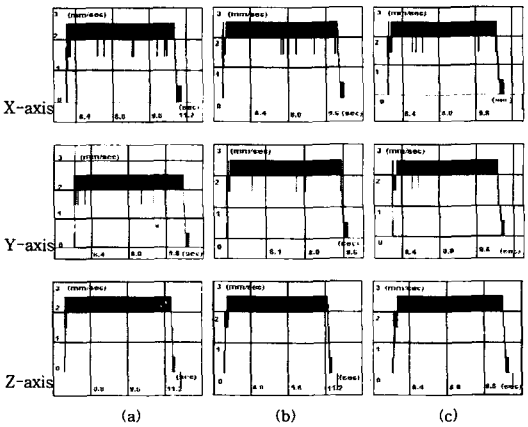

Fig. 11 Experimental results in jog feedrate (Exponential type).
(a) Feedrate : 0.75 m/min, x = y = 25 msec, and z = 20 msec.
(b) Feedrate : 0.75 m/min, x = y = 50 msec, and z = 40 msec.
(c) Feedrate : 0.75 m/min, x = y = 70 msec, and z = 60 msec.

코드인 G01 을 이용하여 직육면체의 모서리 부분을 가공하는 코너가공 실험을 수행하였다. Fig. 12 (a), (b) 는 가감속 형태가 직선형이며 이송속도가 1*m*/min이고 에어커팅 (Air Cutting) 이 없는 경우의 실험이다. (a) 는 종래의 시정수인 15 msec 이며, (b) 는 제시된 시정수인 30 msec 이다. Fig. 12 (a), (b) 에서 보는 바와 같이 ± 70 μm 의 코너 추종오차가 ± 9 μm 으로 줄어듦으로써 제시된 시정수의 타당성이 입증되었다. Fig. 12 (c),

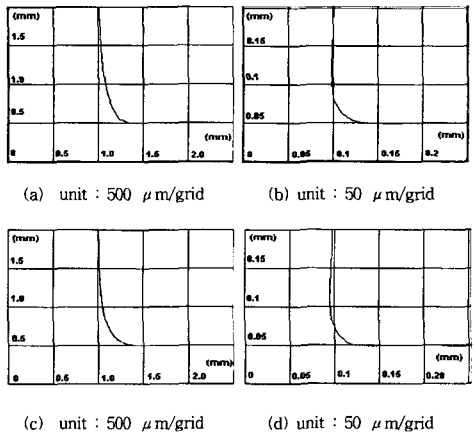

Fig. 12 Machining errors in corner cut.
(a) Linear type (conventional) : Feedrate = 1 m/min, x = y = z = 15 msec.
(b) Linear type (proposed) : Feedrate = 1 m/min, x = y = z = 30 msec.
(c) Exponential type (conventional):Feedrate = 1 m/min, x = y = z = 15msec.
(d) Exponential type (proposed) :Feedrate = 1 m/min, x = y = z = 30 msec.

(d) 는 가감속 형태가 지수형이며 이송속도가 1*m*/min 이고 에어커팅 (Air Cutting) 이 없는 경우의 실험이다. Fig. 12 (c) 는 종래의 시정수인 15 msec 이며, (d) 는 제시된 시정수인 30 msec 이다. ± 60 μm 의 코너 추종오차가 ± 8 μm 으로 줄어듦으로써 제시된 시정수의 타당성이 입증되었다.

5. 결 론

서보모터 시스템에서 보간후 직선형, 지수형 및 벨형 가감속 알고리듬 설계에 관한 연구를 수행한 것으로 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 이산시간 상태방정식으로 표현되는 Recursive 필터를 이용한 지수형, 직선형 및 벨형 가감속 알고리듬을 구축하였다.
2. 공작기계의 급속이송, 절삭이송 및 조그이송에서 지수형, 직선형 및 벨형의 가감속 패턴을 이용하여 부하변동에 강인한 시정수를 결정할 수 있도록 하였다.
3. 코너가공 실험을 통하여 직선형 및 지수형의 코너 추종오차를 줄임으로써 제안된 방법론의 타당성을 입증하였다.

참 고 문 헌

1. Masayoshi Tomizuka, "Zero Phase Error Tracking Algorithm for Digital Control", Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Vol. 109, pp. 65 - 68, 1987.
2. Masayoshi Tomizuka, "Feedforward digital tracking controllers for motion control applications", Advanced Robotics, VSP and Robotics Society of Japan, Vol. 7, No.6, pp. 575 - 586, 1993.
3. H. Ali Pak, G.Q. Li, "Zero Phase Error Tracking Control for Square Sampled Data System", Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Vol. 113, pp. 506 - 509, 1991.
4. Manfred Weck, Guohong Ye, "Sharp Coner Tracking Using the IKF Control Strategy", Annals of the CIRP, Vol. 39, No.1, pp. 437 - 441, 1990.
5. Manfred Weck, "Werkzeugmaschinen Fertigungssysteme Band 3.2", VDI Verlag GmbH, pp. 45 - 48, 1995.
6. Y. Koren and C.C. Lo, "Advanced Controllers for Feed Drives", Annals of the CIRP, Vol. 41/2, pp. 689 - 698, 1992.
7. 신동수, 정성종, "모터의 직선형/ 지수형/ 벨형 가감속 알고리듬", 대한기계학회 추계학술대회논문집 A, pp. 934 - 941, 1996.
8. 신동수, 정성종, "가감속 형태에 따른 운동오차의 영향에 대한 연구", 한국정밀공학회 추계학술대회 논문집, pp. 671 - 677, 1996.
9. John G. Bollinger, Neil A. Duffie, Computer Control of Machines and Processes, Addison-Wesley Publishing Company, pp. 314 - 368, 1988.