

산업용로봇과 CNC공작기계용 디지털 AC 서보모타제어기 개발사례

김 동 일*

(*삼성전자(주) 생산기술센터 자동화연구소 제어기술연구팀)

1. 서 론

현대 산업사회에서 산업용로봇과 CNC공작기계는 공장자동화의 주역을 담당하고 있다. 산업용로봇과 CNC공작기계는 크게 기계적인 부분과 이를 제어하는 전기적인 부분으로 되어 있으며, 기계적인 부분의 핵심은 운동축들로 구성된다. 운동축들은 대부분 전기적 액츄에이터(Actuator)에 의해 구동되며, 이러한 전기적인 액츄에이터로는 DC 나 AC 서보모타가 주류를 이루고 있다. 한편 근래에 들어 AC서보모타는 위상검파를 이용한 상전류제어나 벡터제어방법에 의해 DC 서보모타와 똑같은 제어성능을 낼 수 있음이 증명되고 나서 급격히 실용화되어, 산업계에서 다음과 같은 분야에 광범위하게 사용되고 있다.

- 1) 기계의 소형화 때문에 서보모타의 기계내 장착이 요구되고, 외부에서 쉽게 유지보수할 수 없는 경우(산업용로봇, 공작기계)
 - 2) 한 공장에서 복수개의 서보모타를 사용할 경우 개개의 유지보수가 힘든 경우(트랜스퍼머신)
 - 3) 높은 파워레이트밀도(Power Rate Density)가 요구되는 경우(XY 테이블)
 - 4) 브러시분말이 영향을 주는 환경 (반도체 제조설비, 반도체웨이퍼 핸들링 Mobile 로봇)
 - 5) 열악한 환경에 의한 브러쉬나 정류기의 손상이 우려되는 경우 (사출성형기)
- 이러한 AC서보모타의 장점때문에, 대부분의 경

우 최근의 산업용로봇과 CNC공작기계의 운동축제어에 AC서보모타가 액츄에이터로 사용되고 있다. 한편 산업현장에서 사용되고 있는 산업용로봇과 CNC공작기계에 부착된 AC서보모타는 아직까지 대부분 아날로그소자들로 구성된 아날로그제어기에 의해 구동되고 있으나, 최근들어 몇몇 선진업체가 고속의 DSP(Digital Signal Processor)를 채택하여, 전류(토크), 속도, 위치를 디지털제어하는 디지털제어기를 개발하여 산업용로봇과 CNC공작기계의 운동축을 구동하는 AC서보모타를 제어하고 있다. 디지털 AC서보모타제어기는 아날로그제어기로는 실현 할 수 없거나, 실현에 한계를 가지는 기능과 성능의 확보를 가능하게 하며, 산업용로봇과 CNC공작기계 제어기의 콤팩트(Compact)화, 용이한 유지보수, 제어가가격의 절감등을 실현할 수 있게 한다. 본고에서는 산업용로봇과 CNC공작기계의 고성능동특성, 고정밀제어를 가능하게 하는 AC서보모타의 디지털제어기 개발시 고려해야 하는 사항과 실제 개발 및 적용사례를 소개한다.

2. 디지털 AC 서보모타제어기

디지털 AC 서보모타제어기는 크게 속도형과 버스결합형으로 대별된다. 속도형 디지털 AC서보모타제어기는 전류와 속도를 디지털제어하는 부분과 전원을 포함한 전력증폭부분을 근간으로 구성된다. 한편, 버스결합형 디지털 AC서보모타제어기는 전

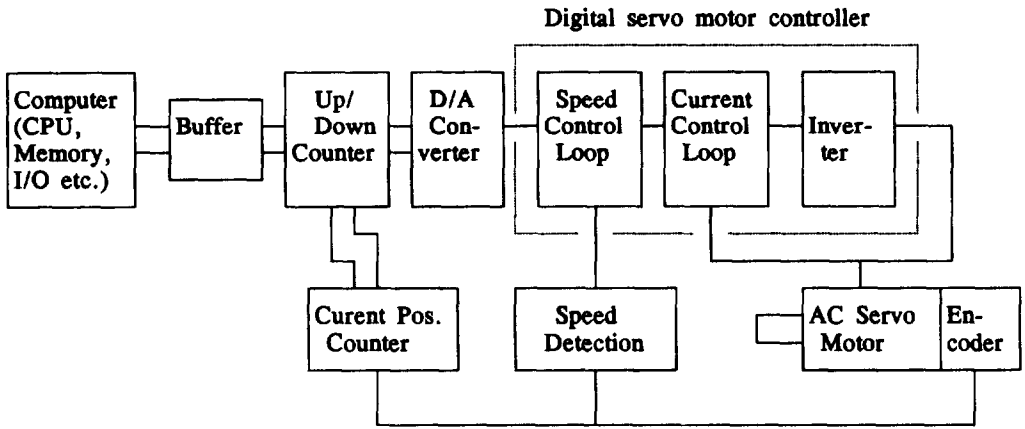


그림 1. 속도제어형 디지털 AC서보모터제어기.

류, 속도, 위치제어 및 가감속부분을 근간으로 구성되며, 호스터컴퓨터시스템(산업용로봇제어기나 CNC공작기계제어기의 주컴퓨터시스템)와 버스를 통하여 연결된다. 속도제어형의 경우 단품으로 시장에 출시할 수 있고, 사용자가 위치제어, 가감속등을 포함하는 운동제어시스템을 구성해서 조합하여 사용해야 하는 불편한 점은 있으나, 원하는 사양의 다축 로봇나 CNC공작기계를 구성하기에 적합하다. 이에 비해 버스결합형의 경우 산업용로봇나 CNC공작기계메이커가 독자적인 표준화된 제어기를 구성하기에 용이하며, 배선이나 결선을 줄일 수 있고, 또한 복수개의 AC 서보모터에 파워를 공급하는 전력증폭부를 1개로 설계할 수 있기 때문에, 제어기의 콤팩트화, 용이한 유지보수, 제어기가격의 절감등의 장점을 가진다.

그림 1은 속도제어형 디지털 AC서보모터제어기를 사용하는 산업로봇과 CNC공작기계의 서보시스템을 보이고 있다. 이시스템에서 컴퓨터는 지령데이터의 설정, 영상신호(Zero Pulse)의 감시에 의한 원점복귀관리, 이의 관리를 위해 여러가지 이상상태감시를 위한 위치편차카운터내용의 판독 및 설정을 수행한다. 이 경우 편차카운터의 비트수는 설계시 정해진 다음 고정되며, 서보시스템의 위치루프이득, 속도루프이득등의 각종상수는 산업용로봇나 CNC공작기계의 기계구조와 결합한 시점에서 조정이 되고 이 후에는 고정된 값으로 유지된다. 그러나 산업용로봇나 CNC공작기계의 경우 기계

적인 특성이 모든 동작범위에서 일정하지 않고 동작에 따라 관성모멘트나 외란토크가 변한다. 따라서 그림1의 서보시스템으로는, 고성능동특성, 고정밀제어특성을 얻는 데는 한계가 있다.

근래에 들어 연산처리속도가 빠른 DSP가 등장함에 따라 그림 2와 같은 버스결합형 디지털 AC서보모터제어기가 등장하게 되었다. 그림 2의 산업용로봇과 CNC공작기계의 버스결합형 디지털 AC서보시스템의 장점을 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 1) 동일한 하드웨어구성으로 여러가지 현대제어 이론들을 실현할 수 있다.
- 2) 산업용로봇나 CNC공작기계의 동력학적인 외란 토크나 간섭토크의 보상이 용이하다.
- 3) 속도 및 위치검출기의 검출리플(Ripple)의 저감, 파워앰프에서의 데드타임(Dead Time)보상이

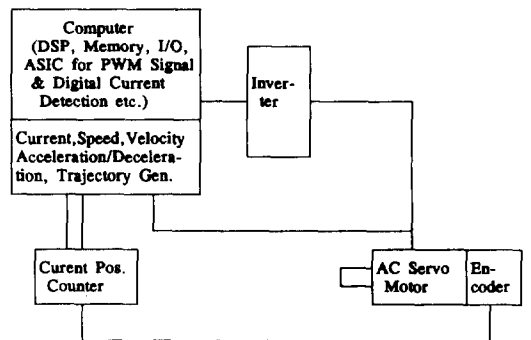


그림 2. 버스결합형 디지털 AC서보모터제어기.

용이하다.

4) 호스터컴퓨터시스템과의 효율적인 통신이 용이하다.

산업용로봇제어기나 CNC공작기계의 제어기에는 버스결합형디지털 AC서보모타제어기의 사용이 서서히 확산되고 있으며, 특히 최근들어 이를 사용할 경우 얻어지는 가공정도나 추종정도의 향상에 관한 결과가 산업계나 학회에 보고되고 있다.

3. 버스결합형 디지털 AC 서보모타제어기

버스결합형 디지털 AC 서보모타제어기가 기본적으로 보유해야 하는 기능들중 대표적인 것으로 가감속, 전류제어, 속도제어, 위치제어 및 고정도를 위한 보상방법등이 있다.

3.1 가감속기능

버스결합형 디지털 AC 서보모타제어기에서는 사용자가 기계가공이나 경로추정의 종류에 따라 적절한 형태의 가감속을 선택할 수 있게 해야 한다. 산업계에서 가장 널리 사용되고 있는 대표적인 3가지 가감속 방법을 소개한다 [1, 2]. 이를 위해 먼저 소프트웨어 가감속알고리즘에 입력되는 궤적데이터를 그림3과 같이 일정시간 계속되는 등간격펄스의 갯수로 표시되는 $f_i(t)$ 로 주어진다 가정하고 궤적데이터 입력 f_i 에 대한 원하는 가감속특성을 가진 출력을 f_o 라고 하자. 그림 3에서 단위펄스 즉 펄스 1개는 물리적으로 End Effector나 공구가 원하는 경로를 따라 움직일 때 단위위치증가분의 지령값을 나타낸다.

가) 직선가감속

$$f_o(k) = [f_i(k) - f_i(k-m)] / m + f_o(k-1) \quad (1)$$

여기서 샘플링주기가 T_s 로 주어지면 가감속시간 t

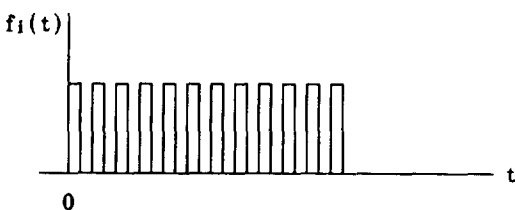


그림 3. 가감속알고리즘의 입력

acc / dec는 다음의 관계식에 의해 결정된다.

$$t_{acc/dec} = mT_s \quad (2)$$

식(3)에서 m 은 직선가감속에서의 버퍼레지스터(Buffer Register)들의 수를 나타낸다.

나) 파라볼릭가감속

직선가감속들을 알고리즘들을 직렬로 수행하면 파라볼릭가감속특성이 얻어진다.

$$\begin{aligned} f_{o1}(k) &= [f_i(k) - f_i(k-m_1)] / m_1 + f_{o1}(k-1) \\ f_{o2}(k) &= [f_{o1}(k) - f_{o1}(k-m_2)] / m_2 + f_{o2}(k-1) \\ f_{op}(k) &= [f_{o(p-1)}(k) - f_{o(p-1)}(k-m_p)] / m_p \\ &\quad + f_{op}(k-1) \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 $m_j, j=1, \dots, p$ 는 각 직선가감속블록에서의 버퍼레지스터들의 수를 나타낸다.

다) 지수함수가감속

$$f_o(k) = (1-a)[f_i(k) - f_o(k-1)] + f_o(k-1) \quad (4)$$

DDA(Digital Differential Analyzer)방식에 기초한 알고리즘의 경우, f_a 를 DDA에서의 Iteration 펄스의 주파수라고하면, a 는 다음과 같이 주어진다.

$$a = 1 / (1 + f_a T_s / 2^n) \quad (5)$$

3.2 기본적인 전류, 속도, 위치제어

AC 서보모타의 제어방법으로 위상검파를 이용한 상전류제어나 벡터제어방법이 가장 널리 사용되고 있다. 여기서는 위상검파를 이용한 상전류제어에 기초를 둔 방법을 설명한다[2]. AC 서보모타의 회전자위치검출은 모타의 회전자에 접속된 리졸버(Resolver)나, 증분형엔코더(Incremental Encoder), 절대증분형엔코더(Serial Absolute Encoder), 또는 절대치엔코더(Absolute Encoder)의 출력을 위상검파하여 검출한다. 검출된 회전자의 위치는 모타의 정류(Commutation)를 위한 정보, 즉 전류명령에 대한 기본정보를 제공한다.

AC 서보모타의 고정자에 고정된 $d-q$ 좌표계에 대한 2극 AC 서보모타의 동방정식은 다음과 같이 표시된다.

$$\frac{di_{ds}}{dt} = \frac{R_s}{L_s - M} i_{ds} + \frac{\Phi_m}{L_s - M} + \omega_r \cos \theta_r +$$

$$\begin{aligned} & \frac{1}{L_s - M} V_{ds}, \\ \frac{di_{qs}}{dt} &= \frac{R_s}{L_s - M} i_{qs} + \frac{\Phi_m}{L_s - M} + \omega_r \sin\theta_r + \\ & \frac{1}{L_s - M} V_{qs}, \quad (6) \\ \frac{d\omega_r}{dt} &= -\frac{B}{J} \omega_r - \frac{3\Phi_m}{2} (i_{qs} \sin\theta_r - i_{ds} \cos\theta_r) \\ & \quad - \frac{T_L}{J} \\ \frac{d\theta_r}{dt} &= \omega_r \end{aligned}$$

여기서 $V_{ds}(V_{qs})$ 는 d축(q축) 고정자 입력전압, $i_{ds}(i_{qs})$ 는 d축(q축) 고정자전류, ω_r 은 모타각속도, Φ_m 은 회전자자속, θ_r 은 모타각변위, L_s 는 고정자 자기인덕턴스, R_s 는 고정자저항, J 는 회전자관성모멘트, M 은 상호인덕턴스, T_L 은 부하토크, B 는 댐핑계수를 각각 나타낸다.

AC 서보모터 동방정식에서의 비선형항들을 보상하기 위하여 V_{ds} 와 V_{qs} 를 다음과 같이 선택한다

$$\begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Phi_m \omega_r \cos\theta_r + (L_s M) u_1 \\ \Phi_m \omega_r \sin\theta_r + (L_s M) u_2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

여기서 u_1 과 u_2 는 새로운 입력들이다.

전류제어에서 고이득이나 포화를 피하기 위하여, 전류제어루우프의 위상지연을 보상하기 위하여 다음의 위상지연상보상기(Phase Lead Lag Compensator)를 사용한다.

$$G_c = \frac{(1+aT_1s)(1+bT_2s)}{(1+T_1s)(1+T_2s)} \quad (8)$$

식(8)에서 $a > 1$, $b < 1$, s 는 라플라스연산자(Laplace Operator)이고, T_1 , T_2 는 보상기의 시상수들이다.

한편 AC 서보모터의 파라메타들은 온도변화, 자기포화등의 요인에 의해 변화하며, 이변화는 제어특성의 저하를 유발한다. 이러한 단점을 보완하여 과도상태뿐만 아니라 정상상태에서도 AC서보모터를 완전하게 전류제어하기 위하여 새로운 입력 u_1 과 u_2 를 다음과 같이 구성한다.

$$u_1 = K_{fc} i_{ds}^* - K_{pi} i_{ds} + K_{if} \int (i_{ds}^* - i_{ds}) dt$$

$$\begin{aligned} u_2 &= K_{fc} i_{qs}^* - K_{pi} i_{qs} + K_{if} \int (i_{qs}^* - i_{qs}) dt \quad (9) \\ K_p &= K_{p1}(\omega_r) + K_{p2} \quad K_i = K_{i1}(\omega_r) + K_{i2} \end{aligned}$$

여기서 K_{p1} , K_{i1} 는 모타속도의 함수로 주어지는 제어이득, K_{p2} , K_{i2} 는 일정제어이득, K_{fc} 는 피이드포워드이득, i_{ds}^* , i_{qs}^* 는 전류명령을 나타낸다.

만약 전류명령을 $i_{ds}^* = I_m \cos\theta_r$, $i_{qs}^* = I_m \sin\theta_r$ 와 같이 인가하면, (7), (8), (9)로 구성되는 전류제어기에 의해 AC서보모터의 동특성을 다음과 같은 선형방정식으로 나타낼 수 있게 된다.

$$d\omega_r/dt = B\omega_r/J + 3\Phi_m I_m/2 T_1/J \quad (10)$$

(10)으로부터 속도제어기는 다음과 같이 구성한다.

$$\begin{aligned} I_m &= K_{fw} \omega_r^* - K_{pw} \omega_r + \\ & K_{iw} \int (\omega_r^* - \omega_r) dt \quad (11) \end{aligned}$$

여기서 K_{pw} , K_{iw} 는 제어이득이고, K_{fw} 는 피이드포워드이득, ω_r^* , ω_r' 는 모타각속도명령 및 추정치를 각각 나타낸다. 모타속도추정치는 다음의 속도관측자에 의해 얻어진다.

$$\begin{aligned} d\omega_r'/dt &= -(B' \omega_r' + \\ & K_{01} \text{sat}((\theta_r - \theta_r')/\delta) + I_m) / J' \\ d\theta_r'/dt &= K_{02} (\theta_r - \theta_r') + \omega_r' \quad (12) \end{aligned}$$

여기서 $\text{sat}(\cdot)$ 는 포화함수, θ_r' 는 모타각변위의 추정치, J' , B' 는 관측자에서 사용된 모타의 관성모멘트 및 댐핑계수, K_{01} , K_{02} 는 관측자이득들을 각각 나타낸다. 식(12)의 모타속도관측자는 잘 알려진 PI형관측자보다 간단하면서 동등의 성능을 가진다. 위치제어도 식(11)과 유사한 제어기에 의해 이루어진다[3,4].

앞서 설명한 바와 같이, 속도제어기의 출력과 위상검파로부터 얻어진 정류정보는 고정자 d, q 전류축 명령을 발생시킨다. 이 전류명령과 실제로 검출된 전류사이의 오차는 전류제어기에 의해 제어되어 실제로 모타의 전류의 동적특성을 무시하게 만든다. 제어된 전류명령과 실제로 검출된 전류사이의 오차는 펄스폭변조신호를 발생시키는 기본 디지털정보가 된다. 이 기본 디지털정보는 그림 4의 디지털컴패레이터(Digital Comparator)를 통하여, 전력증폭부의 MOSFET 인버터를 드라이브하는 펄스폭변조신호가 된다. 보통 이 디지털컴패레이터는

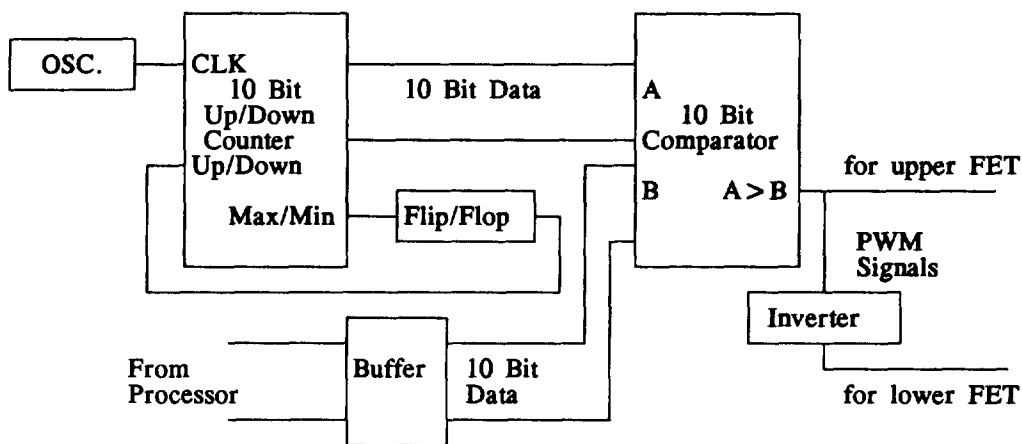


그림 4. 디지털 콤파레이터의 블록선도.

자체적으로 Custom IC화 되거나, Hall센서를 통하여 검출된 전류를 디지털값으로 변환하는 부분과 함께 Custom IC화 되는 경향을 보이고 있다. 그림 5는 Hall센서를 통하여 검출된 전류를 디지털값으로 변환하는 회로의 일예를 보이고 있다.

3.3 고성능동특성, 고정밀제어를 위한 제어방법

앞에서 언급된 가감속과 기본적인 전류, 속도, 위치제어방법이외에도 고성능동특성, 고정밀제어를 위해 디지털 AC 서보모터제어기가 필수적으로 보유해야 하는 제어기능들이 있다. 이러한 제어기능들은 제어변수를 통해 다양한 산업용로봇들이나 CNC공작기계들의 고성능동특성, 고정밀제어를 가능하게 한다. 이러한 고성능동특성, 고정밀제어를 가능하게 하는 주요방법들과 그 기능에 대한 설명은 다음과 같이 요약된다[3][5].

가) 백래쉬보상기능(Backlash Compensation Acceleration Function)

산업용로봇이나 CNC공작기계의 궤도추적이나 가공시 모터의 방향들이 바뀌는 상한(Quadrant)에서 발생하는 궤적이나 가공물에서의 돌출현상을 억제하기 위한 보상기능

나) 고해상도엔코더사용시 미소위치증분(1μ)검출법

속도검출을 위해 고해상도 엔코더를 사용하고 별도의 위치검출기를 사용하여 1 정도의 미소위치증

분을 검출할 때 사용하는 기능

다) 속도루프이득조정기능(Adjustment Function of High Velocity Loop Gain)

산업용로봇이나 CNC공작기계의 강성이 약할 경우 정지시 발생하는 진동을 억제하는 기능

라) 가속도피이드백기능(Acceleration Feedback Function)

모타와 기계부사이에 탄성결합(Spring Coupling)성이 강하거나, 모타에 연결된 외부관성모멘트가 모타의 관성모멘트에 비해 매우 클 경우 제어시 발생하는 진동현상을 억제하는 기능

마) 과도편차보상기능(Overshoot Compensation Function)

1 펄스의 위치명령이 인가된 경우, 미소하게 발생하는 과도편차를 억제하는 기능

바) 속도제어루프이득의 자기동조기능(Self-Adjustment Function of Velocity Loop Gain) 기계와 모타의 합체가 원하는 속도응답을 가지도록 자동적으로 속도제어루프이득을 조정하는 기능

사) 전류의 불감대보상기능

인버터의 상과파워소자의 단락을 막기 위해 설정하는 데드타임(Dead Time)에 의해 발생하는 모타 전류의 불감대(Dead Band)를 보상하는 기능

아) 엔코더펄스분주기능(Electronic Gear Function)

모타에 부착된 엔코더의 펄스를 원하는 N/M

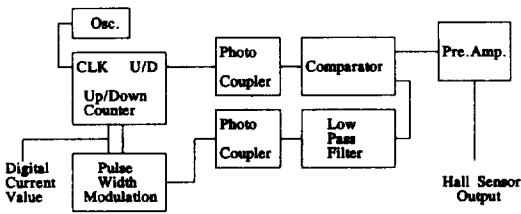


그림 5. 모타전류디지털변환의 블록선도.

(N,M은 서로 다른 정수)배율로 조정하는 기능
 자) 기계속도피이드백기능
 가감속중 모타와 기계사이의 비틀림이나 진동이
 커, 기계와 모타사이의 속도차가 생길 경우 실제 기
 계의 속도를 피이드백시키는 기능
 이외에도 필요한 기능이 여러가지 있으나, 기본
 적으로 이러한 기능들이 확보된 디지털 AC 서보모
 타제어기는 산업용로봇이나 CNC공작기계에 적용
 이 가능하다.

4. 버스결합형 디지털 AC 서보모타제어기의 적용에

TMS320C31를 채택하여 설계한 산업용로봇과 CNC공작기계용 버스결합형 디지털 AC 서보모타 제어기에 앞서 언급한 제어알고리즘을 탑재하여 수평다관절로봇인 스카라로봇에 적용한 예를 소개한다. 버스결합형 디지털 AC 서보모타제어기를 적용한 스카라로봇의 사양은 표 1과 같다.

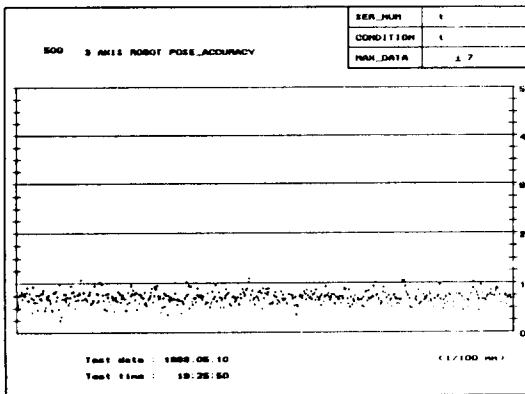


그림 6. 스카라로봇의 반복정밀도.

표 1. 스카라로봇의 사양

item		Specification
Controlled Axes		4 - Axes
Motion range	1 - Axis (degree)	240
	2 - Axis (degree)	290
	Z - Axis (mm)	150
	θ - Axis (degree)	± 180
Max. Speed	1 - Axis (degree/ sec)	360
	2 - Axis (degree/ sec)	360
	Z - Axis (mm/ sec)	400
	θ - Axis (degree/ sec)	720
1,2 Axes Combination Speed		5.4 (m/ sec)
Positioning Repeatability		± 0.05 mm
Cycle Time (sec)		0.7
Pay load (Kgf)	High speed	2.5
	Medium speed	5
	Low speed	10
Drive Method		AC Servo Drive
Weight (Kg)		60
Controller Type		CRS3-4

그림 6은 스카라로봇의 PTP 운동(Point to Point Motion)에 대한 반복정밀도를 보이고 있다. 현재 국제적으로 스카라로봇에 대하여 제시하고 있는 반복정밀도(Positioning Repeatability)에 대한 사양은 ± 0.05 mm이다. 그림 6의 실험결과는 예로든 버스결합형 디지털 AC 서보모타제어기에 의해 제어되는 스카라로봇의 반복정밀도가 ± 0.02 mm내에 있음을 보이고 있다. 적용결과로부터 예로든 버스결합형 디지털 AC 서보모타제어기가 산업용로봇이나 CNC공작기계의 운동제어에 효과적으로 사용될 수 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

디지털 AC 서보모타제어기는 동일한 하드웨어구성으로 여러가지 현대제어이론들의 실현이 가능하며, 또한 산업용로봇이나 CNC공작기계의 동력학적인 외란 토오크나 간섭토오크등의 보상이 용이하고, 호스터컴퓨터시스템, 즉 산업용로봇이나 CNC공작기계의 주제어기와 고속통신을 효율적으로 가능하게 하는 등의 여러가지 장점을 가지고 있다.

이러한 장점들과 더불어, 특히 버스결합형 디지털 AC 서보모타제어기의 경우 산업용로봇과 CNC 공작기계 제어기의 컴팩트화, 용이한 유지보수, 제어기가격의 절감등을 쉽게 실현할 수 있기 때문에 향후 필연적으로 널리 사용되리라 예상된다. 따라서 본 고에서는 이러한 맥락에서, 버스결합형 디지털 AC 서보모타제어기가 필수적으로 보유해야 하는 가감속과 기본적인 전류, 속도, 위치제어방법이 외에도 고성능동특성, 고정밀제어를 위해 디지털 AC 서보모타제어기가 필수적으로 보유해야 하는 제어기능등에 요약하여 소개하고, 실제 개발 및 적용에 관한 한 사례를 소개하였다.

참 고 문 헌

- [1] D. I. Kim, J. W. Jeon, and S. Kim, "Software Acceleration/Deceleration Methods for Industrial Robot and CNC Machine Tools," will appear to Mechatronics, 1994.
- [2] J. W. Jeon, S. Park, D. I. Kim, and S. Kim, "An Efficient Trajectory Generation for Industrial Robots," Proc. of IEEE IAS'93, pp. 2137-2143, Toronto, Canada, 1993.
- [3] D. I. Kim, J. W. Lee, S. Kim, "Full Digital Joint Motion Controller for Industrial Robot and CNC Machine Tool," will appear to IEEE IECON'94.
- [4] Y. Dote, Brushless Servomotors-Fundamentals and Applications, Ch. 6, Clarendon Press, 1990.
- [5] FANUC AC Servo Unit (Digital)-Maintenance Manual, 1987.



김동일(金東日)

1959년 6월 13일생. 1982년 서울대 공대 제어계측공학과 졸업. 1984년 동 대학원 제어계측공학과 졸업(석사). 1989년 동 대학원 제어계측공학과 졸업(박사). 1988년 10월~현재 삼성전자 생산기술센터 자동화연구소 근무 현재 제어기술연구팀장, 수석연구원.