

## NC 시스템의 고속화 연구

°정광조 강용근 정재문 홍인근  
한국기계연구소 자동제어실

### A Study on High Speed and Resolution of NC System

G. J. Chung, Y. G. Kang, J. M. Chung, I. K. Hong

Automatic Control Lab., Korea Institute of Machinery and Metals

#### ABSTRACT

The solution of problems in the automation of mold manufacturing process are high speed and resolution. To catch two problems at once, digital servo system will be essential replacing the analog servo system. In this paper, we tried some hardware / software approach including, designing basic structure, modeling of servo actuator, and designing & simulating of velocity & position controller. Finally, we constructed the hardware for 1 axis digital servo controller of NC system. As a result we obtained the design technics of digital servo systems for high speed NC system.

#### 1. 서론

1980년대 중반까지 NC 제어기 분야의 선진기술 보유국들은 가장 수요가 많은 중·저급 기종에 맞는 모델을 주로 생산해 오면서 기술개발 방향도 이들 기종에 적합한 대화형 NC 장치에 주력해 왔으나, 최근에는 일본을 중심으로 새로운 형태의 NC 장치를 개발하는데 주력하고 있는데 그 방향은 고정도 및 고속 가공으로 옮겨져 가고 있으며 컴퓨터 기술, 계측제어 기술 및 S/W의 고도화에 따른 AI 기술을 NC장치에 추가함으로써 복잡형상의 고정도 가공 기술의 실현을 뒷받침하고 있다.

이러한 고속·고정도를 실현시킬 수 있게하기 위해서는 기계 자체의 정도 향상, NC 장치의 연산기능 고속화, operating 시스템을 포함한 S/W의 고급화 등이 실현되어야 하지만 근본적인 기술은 기존의 아날로그서보에 대한 디지털서보 제어기술의 대체실현이다.

본 연구는 NC 시스템의 고속화 실현을 위해 설계된 디지털서보 제어장치의 속도 및 위치제어기와 이의 실험에 관해 논하였다. 고속 NC 시스템 개발을 위한 전단계의 연구로서 NC 시스템 고속화의 핵심기술이라 할 수 있는 디지털서보 제어기를 1축용으로 설계하고 이에대한 시뮬레이션을 통해 종래의 아날로그 서보제어기로는 처리가 불가능했던 전류제어를 위한 각종 알고리즘을 소프트웨어로 처리할 수 있도록 하는데 주안성을 두고 있다.

#### 2. 고속 NC 용 서보제어시스템의 설계개념

NC 시스템의 고속화를 실현함에 있어서 정도(accuracy)를 간과할 수 없으므로 고속화라는 것은 고정도를 포함하는 것으로 생각해야 한다. 고속 NC를 실현하기 위한 서보 제어시스템을 그림 1과 같이 가정하고 각 요소별 설계조건을 다음과 같이 한다.

- o ball screw lead(L): 10mm/rev
- o motor 최고 rpm(S): 2,000rev/min
- o encoder 출력 pulse(Prpm): 25,000 pulse/rev
- o DMR= 4, CMR = 1
- o backlash, lost motion : 무시

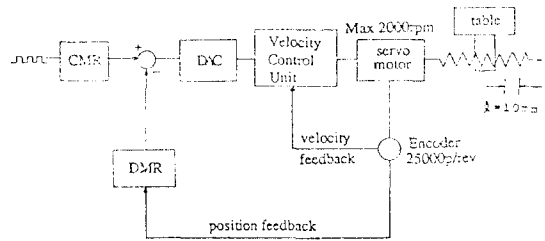


그림 1. 고속 NC의 서보개념

Fig 1. Servo system of NC machine with high speed & resolution

위 시스템에서 최소지령증분치와 최소검출단위를 동일하게 1 pulse로 설계하면 최대이송속도는 다음과 같이 얻어진다.

$$V_{max} = S \times L \times 10^{-3} = 20 \text{ m/min}$$

일반적인 속도형 서보를 NC에 적용할 때에는 달리 미소블럭의 연속가공을 고속으로 처리해야할 경우 (예를 들면 금형가공), 미세한 지령 pulse량에 대한 빠른 추종성을 필요로 하므로 위치 loop gain을 적절히 크게 하여야 가능하다. 그러나 위치 loop gain을 크게 하면 속도 loop gain도 커져야 하므로 매끄러운 응답을 기대할 수 없게 된다. 따라서 적절한 방법으로 이들 gain을 속도, 정도, 및 부하상태를 고려한 최적의 상태로 실시간 조정이 가능하도록 하지 않으면 위와 같은 위치정도와 이송속도의 개념은 실현이 불가능하게 된다. 그러므로 이러한 gain들의 실시간 조정이 가능한 하드웨어 구조를 갖추어야 하고 이에따른 파라미터를 시뮬레이션을 통해 선정하게 된다.

3. 디지털 속도제어의 설계

서보모터의 수식모델은 그림 2와 같다.

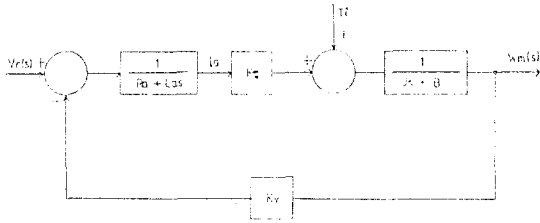


그림 2. 서보모터의 모델

Fig 2. Model of servo motor

전달함수는

$$G(s) = \frac{1/K_v}{sT_m + 1}$$

로 나타내어진다.

그런데, 3상 모터에서 정전파 전류제어를 위해서는 전류 제한 제어가 필요하므로 전류제어를 포함한 블록선도는 그림 3과 같이 나타내어진다.

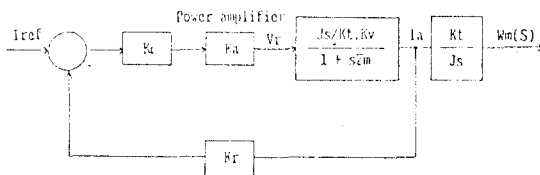


그림 3. 서보모터의 전류제어 블록 선도

Fig 3. Current control system of servo motor

그림 3에서 Ia(s)/Iref(s)는 식 ①과 같이 구해진다.

$$\frac{I_a(s)}{I_{ref}(s)} = \frac{1}{K_r} \quad \text{..... ①}$$

한편, sampled-data 방식에 의한 서보모터의 속도제어계를 그림 3과 식 ①을 이용하여 구성하면 그림 4와 같다.

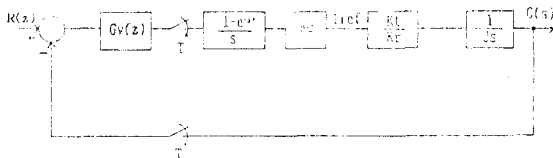


그림 4. 서보모터의 디지털 속도제어기 블록선도

Fig 4. Digital velocity controller of servo motor

단, Gv(z) : Velocity controller

Kc : DAC gain

그림 4에서 성능지수  $P = \int_0^{\infty} e^2(t)dt$  를 최소화하고 안정

조건을 만족하는 PI형 Gv(z)를 설계한다.

$$G_v(z) = K_p + K_I \cdot \frac{T}{2} \cdot \frac{z+1}{z-1} \quad (\text{Bilinear transformation})$$

로 두고, zero-order hold를 포함한 애널로그부분을 z-transformation 하면

$$G(z) = Z[G(s)]$$

$$= \frac{KT}{z-1}$$

closed loop의 전달함수는 다음과 같다.

$$\frac{C(z)}{R(z)} = \frac{KT(K_p + \frac{TK_I}{2})z + KT(\frac{TK_I}{2} - K_p)}{(z-1)^2 + KT(K_p + \frac{TK_I}{2})z + 1 + KT(\frac{TK_I}{2} - K_p)} \quad \text{②}$$

식 ②의 특성함수는

$$P(z) = z^2 - [2 - KT(K_p + \frac{TK_I}{2})]z + 1 + KT(\frac{TK_I}{2} - K_p)$$

Jury's criteria를 적용하면 안정조건은 다음과 같다.

$$|P(0)| < 1, P(-1) > 0, P(1) > 0$$

$$K + KT(\frac{TK_I}{2} - K_p) < 1$$

$$KT^2K_I > 0$$

$$4 - 2KTK_p > 0$$

시간 응답은 식 ②로부터 아래와 같이 주어진다.

$$\frac{C(z)}{R(z)} = \frac{Az + B}{z^2 - (2-A)z + 1 + B}$$

여기서,  $b = KTK_p$ ,  $c = \frac{KT^2K_I}{2}$  라 하면  $A = b + c$ ,  $B = c - b$  이다.

윗식을 이용하여 아래 세 경우에 대한 성능지수 P를 구한다.

$$(1+B) > \{ (2-A)/2 \}^2$$

$$(1+B) < \{ (2-A)/2 \}^2$$

$$(1+B) = \{ (2-A)/2 \}^2$$

위의 세 조건과 안정조건에서  $0 < b < 2$ ,  $0 < c < b$  를 만족하는 범위에서 성능지수 P를 최소화하는 b, c를 구하면  $b = 1.0$ ,  $c = 0.001$  일때  $P = 0.073125$ 이다.

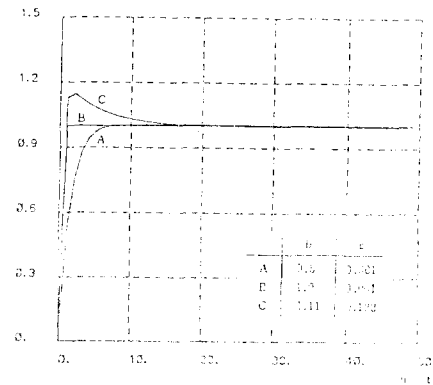


그림 5. 속도의 시간 응답

Fig 5. Velocity-time response

그런데  $K_p = \frac{b}{KT}$ ,  $K_I = \frac{2c}{KT^2}$  이고, K는 모터상수에 의해 결정되므로 b, c와 sampling time T가 정해지면  $K_p$ 와  $K_I$ 를 구할 수 있다. 그림 5는 3가지의 b, c 값에 대해 단위 계단함수를

입력시켰을 때의 속도의 시간응답이다.  $b = 0.1, c = 0.001$  일 경우 가장 최적의 속도 응답이 얻어짐을 보여주고 있다. 사용된 모터의 특성 및 계산에 사용된 parameter는 참고문헌 [12]를 참고바란다.

#### 4. 디지털 위치제어기 설계

앞에서 설계한 PI형 속도제어기를 포함한 위치제어기의 모델은 그림 6과 같이 나타내어진다.

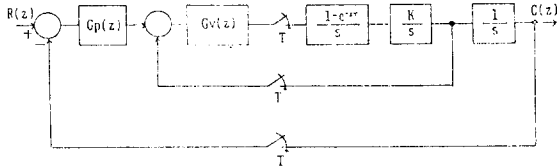


그림 6. 위치 제어기 블록선도

Fig 6. Block diagram of position controller

이 시스템의 closed loop 전달함수는

$$H(z) = \frac{G_p(z) G_v(z) G_I(z)}{1 + G_v(z) G_o(z) + G_p(z) G_v(z) G_I(z)} = \frac{G_p(z) G'(z)}{1 + G_p(z) G'(z)}$$

$$\text{단, } G_o(z) = Z \left[ \frac{1 - e^{-sT}}{s} \cdot \frac{K}{s} \right] = \frac{KT}{z-1}$$

$$G_I(z) = Z \left[ \frac{1 - e^{-sT}}{s} \cdot \frac{K}{s^2} \right] = \frac{KT^2(z+1)}{2(z-1)^2}$$

$$G'(z) = \frac{G_v(z) G_I(z)}{1 + G_v(z) G_o(z)}$$

b, c를  $G'(z)$  에 대입하면

$$G'(z) = \frac{\frac{T}{2} [(b+c)z^2 + 2cz + (c-b)]}{z^3 + (b+c-3)z^2 + (3-2b)z + (b-c-1)} \dots \textcircled{3}$$

그런데  $G_p(z) = K_{pp}$  즉 비례 제어기로 설계하면

$$H(z) = \frac{\frac{K_{pp}T}{2} [(b+c)z^2 + 2cz + (c-b)]}{z^3 + [(b+c-3) + \frac{K_{pp}T}{2}(b+c)]z^2 + [3-2b + \frac{K_{pp}T}{2} \times 2c]z + [(b-c-1) + \frac{K_{pp}T}{2}(c-b)]}$$

식 ③에서 속도 제어기 설계시의 b, c, T를 적용하여, 이산 근궤적 (discrete root locus)을 이용하여 시스템이 안정한  $K_{pp}$ 의 범위를 구하자.  $b = 1.0, C = 0.001, T = 0.001$  일때

$$G'(z) = \frac{(1.001z^2 + 0.002z - 0.999) \times 5 \times 10^{-4}}{z^3 - 1.999z^2 + z - 0.001}$$

$$H(z) = \frac{G_p(z) G'(z)}{1 + G_p(z) G'(z)}$$

에 대해 근궤적을 구하면 그림 7과 같고, 안정할 조건은  $0 \leq K_{pp} \leq 1800$  이다. 한편 open loop pole은

$$1.00201 \times 10^{-3}$$

$$9.98027 \times 10^{-1}$$

$$9.99971 \times 10^{-1}$$

이다. 이에 대한 근궤적을 그려보면 그림 7과 같이되고  $K_{pp} > 1800$ 에서 단위원  $|z| = 1$ 을 벗어나 불안정하게 됨을 알 수 있다.

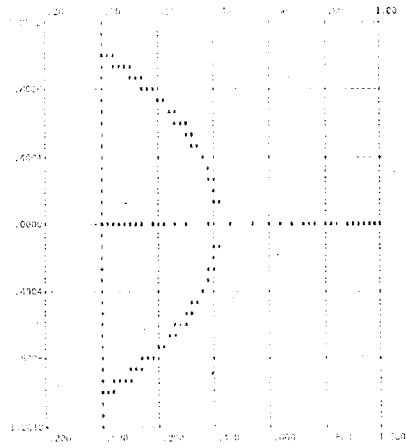


그림 7.  $H(z)$ 의 근궤적 ( $T = 0.001s$ )

Fig 7.  $H(z)$ 's root locus

또한  $K_{pp}$ 의 안정한 범위내에서의 몇가지 경우에 대해 위치제어의 시간 응답을 구해보면 그림 8과 같이 gain이 클수록 불안정한 진동이 나타나게 된다. NC제어에 있어서 절삭시의 overshoot는 존재하지 않아야 하므로 overshoot가 없는 범위내에서 적절한 gain을 추출하고 이를 제어가능한 위치 gain의 최고치로 한다. 시뮬레이션의 결과로는 400 ~ 500 사이의 값에서 이러한 gain이 존재한다고 추정되고 부하 변동이나 기타 외란에 의해 이 값은 dynamic하게 이동하게 된다.

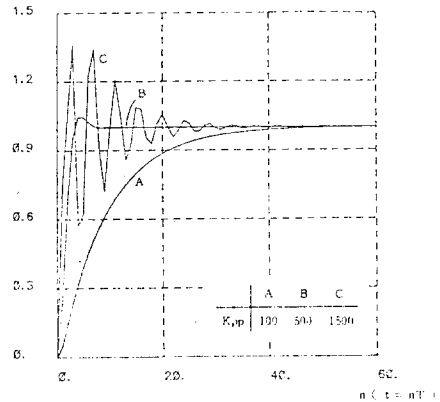


그림 8. 위치 제어 시간 응답 ( $b = 1.0, c = 0.001$ )

Fig 8. Position-time response

#### 5. 디지털 NC 하드웨어 구성

앞에서 설계한 위치 및 속도제어 시스템을 디지털로 실현하기 위하여 그림 9와 같이 1축용 디지털 NC 하드웨어를 구성하였다.

위치 및 속도 궤환은 CPU의 데이터 버스로 연결되어 계산 알고리즘을 소프트웨어로 처리하고 계산된 전류 지령이 PWM 회로를 통해 power transistor로 전달된다.

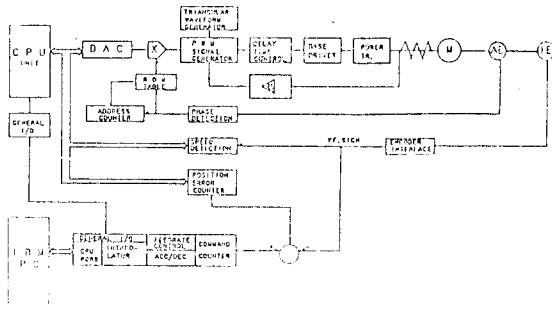


그림 9. 1축용 디지털 NC 하드웨어 구성도  
Fig 9. Digital NC hardware for 1 axis control

실험대상인 디지털 서보 앰프는 FANUC사의 모델로서 power transistor 및 base driver회로 그리고 sensor interface 신호를 중심으로 비교적 간단한 구조로 되어 있다. 서보앰프의 입력 신호(제어용신호, sensor interface 신호)는 서보 앰프의 요구사양에 맞게 외부 회로와 접속한다. 회전자 위상 검출은 absolute/incremental encoder를 이용한다. 그런 전류지령치의 순시적인 변화량이 위상검출 분해능보다 크므로 incremental encoder 출력 PA, PB를 적절히 분주하여 사용한다. 실제로는 ROM으로 R과 S상의 전류위상 지령을 검하도록 설계하여 PA는 4분주하여 출력시킨다. (그림 10.) 회전속도 검출은 incremental encoder를 사용하여 일정 sampling 주기마다 encoder 출력 펄스를 counting 하는 방식을 채택하였다.

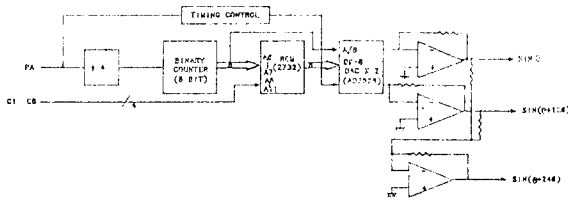


그림 10. 위상검출 및 전류제어 지령 발생회로  
Fig 10. Phase detection & current command generating circuit

회전속도 검출은 incremental encoder를 사용하여 일정 sampling 주기마다 encoder 출력 펄스를 counting하는 방식을 채택하였다. 회전방향 검출은 PA, PB 신호의  $\pm 90^\circ$  위상차를 이용하고, 위상이 바뀌는 시점이 실제 모터의 회전방향 변화보다 PA, PB를 1 clock (4MHz) 지연시킨다.

위치 지령 발생부와 궤환 신호와의 비교 및 에러처리부로 구성되는 위치제어기 하드웨어는 고정도 위치지령을 위하여 펄스열 형태의 위치지령을 발생하도록 하여 궤환 신호와의 비교를 카운터의 up/down 기능으로 간단히 처리하였다. 비교기와 error counter 부분은 그림 11과 같다.

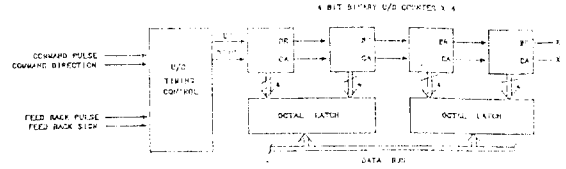


그림 11. 위치 에러 카운터 회로  
Fig 11. Position error counter circuit

### 6. 속도제어 알고리즘

앞에서 설계한 PI형 속도제어기를 대상으로 전류지령을 고려하여 그림 12와 같이 생각할 수 있다. 그림에서  $I_r = (K_p + K_I \cdot \frac{T}{2} \cdot \frac{z+1}{z-1}) E_v$

$$= \frac{1}{z-1} [(K_p + K_I \cdot \frac{T}{2}) z + (K_I \cdot \frac{T}{2} - K_p)] E_v \quad \text{④}$$

여기서 K를 sampling 횟수로 하고 T를 1 msec로 하면

$$I_r \cdot Z = I_r(k+1) \text{ 이므로}$$

$$\text{④는 } I_r(k+1) - I_r(k) = (K_p + K_I \cdot \frac{T}{2}) E_v(k+1) + (K_I \cdot \frac{T}{2} - K_p) E_v(k) \\ \text{또는 } I_r(k) = I_r(k-1) + (C_0 + C_1) E_v(k) + (C_1 - C_0) E_v(k-1)$$

$$\text{여기서, } C_0 = K_p \approx 94.78$$

$$C_1 = K_I \cdot \frac{T}{2} \approx 0.095$$

그러므로

$$I_r(k) = I_r(k-1) + 94.78[E_v(k) - E_v(k-1)] + 0.095[E_v(k) + E_v(k-1)]$$

그런데  $E_v(k), E_v(k-1)$ 의 값이 변하는 범위를 고려하면  $V_r$ 이 3.3MHz로 입력되고 sampling 주기(1 msec) 동안  $V_f$ 가 전혀 입력되지 않은 경우에 최대 또는 최소가 되므로  $E_v(k)$ 는 0 ~ 3333 pulse로 계산된다. 그런데 DAC의 입력은 12bit로 0 ~  $\pm 2047$ 의 입력범위를 가지므로 계산되는  $E_v(k)$ 는  $E_v(k) = E_v(k) \cdot \frac{2047}{3333}$ 로 normalize 한다.



그림 12. 속도제어 알고리즘의 블록선도  
Fig 12. Block diagram of current control algorithm

이를 고려하면 결국

$$I_r(k) = 58.2[E_v(k) - E_v(k-1)] + \frac{1}{17.2}[E_v(k) + E_v(k-1)] + I_r(k-1) \text{ 이 된다.}$$

이 식은 곱하기 1회와 나누기 1회를 포함하는 계산으로 가능하며 8086 CPU의 기능으로 쉽고 빠르게 처리된다. 그림 13은 이러한 계산을 포함하는 속도제어 알고리즘의 흐름도로써 결론적으로 현재의 전류지령  $I_r(k)$ 는 한 sampling 구간전의 지령과 에러, 그리고 현재의 에러량으로부터 계산할 수 있다. 실제로 알고리즘의 어셈블러 언어로 구현하여 실현한 결과 속도제어 알고리즘의 계산시간은 약 0.06 msec가 소요되었고 앞으로 위치제어 알고리즘을 고려한다 하여도 예상했던 1 msec의 sampling 주기로 충분히 속도 및 위치제어가 가능함을 입증하였다.

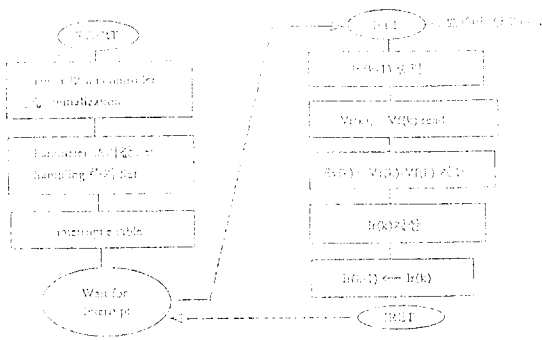


그림 13. 속도제어를 위한 소프트웨어 흐름도  
 Fig. 13 Software flowchart for current control

### 7. 결론

고속 NC 를 개발하기 위한 연구의 초기단계로서 고속 NC 실현의 핵심기술이라 할 수 있는 디지털 서보 제어시스템 (1축용) 을 설계, 해석 및 시뮬레이션을 통해 최종적으로 하드웨어를 제작, 실험하였다.

현단계로서는 이러한 방법을 통해 구성된 하드웨어가 충분히 고속 NC 로서의 기능을 발휘할 것인지는 더 많은 실험을 거쳐야 하겠지만 종래의 애널로그방식에서 처리할 수 없었던 전류제어를 위한 각종 알고리즘을 소프트웨어로 처리가능하게 만들 수 있다는 것을 확인함으로써 계속적인 연구를 통해 가능하리라 생각된다. 문제를 실제 하드웨어를 구성하여 적용시킬때 dynamics 등에서 발생하는 비선형 파라미터를 어떻게 찾아낼 수 있는가 하는 등의 실험적, 경험적 요소들의 처리이다.

이들 문제점을 중심으로 시스템을 2축으로 증설하여 연구를 계속하고자 한다.

### 8. 참고문헌

- [1] 垣野義昭, "NC 공작기계에서의 고속화와 고정도화", 機械와 工具, Vol. 29, No. 5, pp. 2 ~ 30, 1985.
- [2] 安井武司, "NC 공작기계에서의 시스템대응기술", 機械와 工具, Vol. 29, No. 5, pp. 31 ~ 36, 1985.
- [3] 中田毅, "서보기구의 고성능화설계 (서보기구의 고성능화)", 機械設計, Vol. 30, No. 12, pp. 26 ~ 31, 1986.
- [4] 鏡田眞一, "서보기구의 고성능화 설계 (서보기구의 구성과 구성요소)", 機械設計, Vol. 30, No. 12, pp. 32 ~ 39, 1986.
- [5] 領本正入, "고속 3차원 CNC", 精密工學會誌 (日), Vol. 53, No. 7, pp. 1018 ~ 1021, 1987.
- [6] 堤正臣, "초고속화와 interface 기술", 精密工學會誌 (日), Vol. 53, No. 7, pp. 1014 ~ 1017, 1987.
- [7] 노태석, "로봇틱 매니플레이터를 위한 서보제어장치 설계에 관한 연구", 석사학위논문 (KAIST), 1986.
- [8] 이봉진, "수치제어 이론과 실제", 현문출판사, 1978.
- [9] 南文鉉譯, "자동제어 계산법", 동명사, 1985.
- [10] Charles L. Philips, Royce D. Harbor, "Feedback Control Systems", PH international, 1988.

- [11] 윤명중외, "공정자동화를 위한 Digital Direct Drive AC Servo System 기술개발 (I)", 과학기술처 연구보고서, 1989.
- [12] Servo motor FANUC model 2-0 data sheet.