

마이크로 컴퓨터에 의한 전기·유압 서보시스템의 속도제어

장효환, 김영준, 안병천
고려대학교 공과대학 기계공학과

Microcomputer-based Velocity Control for an Electro-hydraulic Servo System

H.W. Chang, Y.J. Kim and B.C. Ahn
Dept. of Mechanical Engineering, Korea University

Abstract

In the microcomputer-based velocity control for an electro-hydraulic servo system, the effects of control methods and control hardware on the performance of the system were investigated. Experiments were carried out with PID and deadbeat controllers using 8 or 16 bit microprocessor and 8 or 12 bit A/D and D/A converters. It is found that the transient response of the system is better with PID controller than with deadbeat controller. When the number of bits of the microprocessor and converters are small, it is also found that amplitude quantization due to limited wordlength gives significant effects on transient responses of the system. Analytically predicted step-responses are in good agreement with experimental ones.

1. 서론

전기·유압 속도제어 시스템에서 제어기로 종래에는 연산증폭기등을 이용한 아날로그 제어방식을 주로 사용하여 왔으나 최근에는 마이크로컴퓨터의 고성능화, 소형화, 저렴화로 이를 이용한 디지털 제어방식이 점점 많이 사용되어 가고 있다.(1) 또한, 공작기계계의 CNC 화와 산업용 로봇의 연속경로제어 기능, 패턴 인식기능 등 고기능화, 정밀화를 위하여 제어용 마이크로 컴퓨터는 최근 16 비트 또는 32 비트 마이크로 프로세서를 사용하는 경향으로 바뀌고 있다.(2) 따라서, 이러한 기계들에 단위장치로 사용되는 전기·유압 속도제어 시스템의 마이크로컴퓨터에 의한 디지털 제어에 대한 기초적인 연구가 요망되고 있다.

본 연구의 목적은 마이크로컴퓨터를 사용하여 전기·

유압 서보 시스템의 속도제어를 하는데 있어서 제어방법과 제어기 기본 하드웨어인 마이크로프로세서와 A/D, D/A 변환기의 해상도가 전체시스템의 성능에 미치는 영향을 주로 실험적으로 연구하는데 있다.

2. 시스템 모델링

본 연구에서 사용한 전기·유압 서보시스템의 블록 선도가 Fig.1 에 나타나 있다. 서보밸브에서 토르모터 구동전류와 스톱 변위와의 관계식을 1차 함수로 가정하였을때, 제어대상의 전달함수는 다음과 같다.(3, 4)

$$G_p(s) = \frac{60}{2\pi} \cdot K_e K_f / D_m (1 + \frac{K_{ce} B_m}{D_m^2}) \quad (1)$$

$$(\tau_v s + 1) (\frac{s^2}{\omega_n^2} + 2\delta_n \frac{s}{\omega_n} + 1)$$

여기서

$$\omega_n = \sqrt{\frac{4\beta_0 D_m^2}{J_e V_t} (1 + \frac{K_{ce} B_m}{D_m^2})}$$

$$\delta_n = \frac{1}{D_m} (\frac{V_t B_m}{4\beta_e} + K_{ce} J_t) \sqrt{\frac{\beta_e}{J_e V_t (1 + \frac{K_{ce} B_m}{D_m^2})}}$$

본 실험에서 사용한 시스템 상수들을 윗식에 대입하면 다음과 같다.

$$G_p(s) = \frac{9.0731 \times 10^7}{(s+33.3333)(s+386.9313)(s+68.4116)} \quad (2)$$

ZOH 와 제어대상을 펄스전달함수로 나타내면 다음과 같다.

$$G_{ho}G_p(z) = (1-z^{-1}) Z \left[\frac{1}{s} G_p(s) \right]$$

$$= \frac{b_1 z^2 + b_2 z + b_3}{z^3 + a_1 z^2 + a_2 z + a_3} \quad (3)$$

여기서 a_i 와 b_i ($i=1,2,3$) 는 샘플링시간에 따라 결정되는 상수이다.

PID 제어기의 전달함수는 적분기로 사다리꼴 근사화 방법을 사용하였을때 다음과 같다.(5)

$$G_c(z) = \frac{M(z)}{E(z)} = \frac{k_1 z^2 + k_2 z + k_3}{z^2 - z} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \text{여기서 } k_1 &= K_f + \frac{K_i T}{2} + \frac{K_d}{T} \\ K_2 &= K_p + \frac{K_i T}{2} - \frac{2K_d}{T} \\ K_3 &= \frac{K_d}{T} \end{aligned}$$

데드비트 제어 방식으로 본 연구에서는 최소모형응답 (minimal prototype response) 기법, 무파형 응답 (ripple-free response) 기법, 최소오차 응답 (minimal error response) 기법을 사용하였으며 각각의 이론(6)을 적용하면 다음과 같은 디지털제어기의 전달함수를 얻는다. (개단입력경우)

먼저 제어기의 전달함수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$D(z) = \frac{1}{G(z)} \cdot \frac{K(z)}{1-K(z)} = \frac{M(z)}{E(z)} \quad (5)$$

여기서 $G(z) = K_T \cdot G_{ho} G_p(z)$

최소모형응답 기법은 최소수의 샘플링(nT) 후에 시스템출력이 기존 입력과 같도록 설계하는 방법이며 이때 K(z)는 다음과 같다.

$$K(z) = z^{-1} \quad (6)$$

무파형 응답기법은 앞의 기법이 샘플링 사이에서 진동하게 될 가능성이 크므로 이를 배제시키기 위한 방법으로 관계식은 다음과 같다.

$$K(z) = z^{-1} (1 + \frac{b_2}{b_1} z^{-1} + \frac{b_3}{b_1} z^{-2}) d_i \quad (7)$$

$$1-K(z) = (1-z^{-1})(1+d_2 z^{-1} + d_3 z^{-2})$$

여기서 $b_i' = b_i/K_T$, $d_i = f(b_1', b_2', b_3')$

또한 최소오차응답 기법은 위의 두가지 기법이 적당치 못한 샘플링시간에 있어서 오버슈트를 나타내므로 이러한 오버슈트를 줄이기 위해 제곱오차 적분을 최소화시키는 방법으로서 관계식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} K(z) &= 0.5 z^{-1} (1+ z^{-1}) \\ 1-K(z) &= (1+0.5z^{-1})(1-z^{-1}) \end{aligned} \quad (8)$$

위의 식 (6), (7) 과 식 (8)을 식(5)에 각각 대입하여 차분방정식을 얻어 프로그래밍하면 각각의 데드비트제어기가 구성된다.

3. 실험장치 및 실험방법

본 연구에 사용한 전기 유압 속도제어시스템은 축양기와 가변용량형 압력보상펌프로 구성된 유압동력장치와 MOOG Series 62 의 서보밸브, 내절기어형의 유압모

터, DC 타코미터, VCCS 및 디지털 제어기로 구성하였다 여기서 디지털제어기는 Z-80A 8 비트 마이크로프로세서와 MC68000 16 비트 마이크로프로세서를 각각 CPU 로 내장한 Cromemco Model CS3/3C 와 A/D, D/A 변환기로서 3비트와 12비트의 해상도를 갖는 것은 각각 사용하였다. 실험장치의 개략도는 Fig.3 에 나타나있다.

디지털제어기의 제어프로그램은 연산속도가 빠른 어셈블리 언어를 사용하였으며 연산중에 발생하는 수치오차를 줄이기위해 4바이트 (byte)고정소숫점 방법을 사용하였다. 샘플링 시간은 PID제어의 경우 두종류 마이크로 프로세서를 사용하였을때 각각의 최소연산시간을 고려하여 MC68000에서는 0.4ms, Z-80ms에서는 4ms로 하였고 데드비트제어의 경우 예비실험을 통하여 제어가 가능한 샘플링 시간을 찾아 내었고그값 전후로 샘플링 시간을 변화시키며 시스템의 과도응답특성을 측정하였으며, 샘플링 시간의 조절은 프로그램내에 지연루프를 삽입하여 행하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 제어방법의 영향

PID 제어에서 예비실험과 시뮬레이션을 통하여 응답특성이 좋은 한 경우를 기준조건으로 선정하고 그 기준조건으로부터 고찰하려는 제어계수를 변화시켰을 때 시스템의 응답특성이 Fig.3 과 4에 나타나 있다.

그림에서 볼 수 있는 것처럼 K_p 값의 제한된 증가는 시스템에 감쇠 효과를 주기 때문에 충분히 큰 K_i 값을 사용함으로써 양호한 응답을 얻을 수 있었다. K_d 값의 증가는 시스템에 추가적인 감쇠를 주나 어느정도 이상이 되면 잡음이 증폭되어 오히려 응답이 불안정하여지고 이런 경향은 샘플링 시간이 짧을 수록 심하여졌다.

위에서 고찰한 제어계수의 변화를 통한 실험결과 기준 ($K_p=5$, $K_i=150$, $K_d=0.02$) 에서 최적에 가까운 응답 특성을 얻을 수 있었으나 이러한 적절한 제어계수의 선정에 많은 실험과 시간이 소요되므로 앞에서 기술한 폴-제로 소거 방법에 의해서 선정된 제어계수를 사용하여 시스템의 응답 특성을 구해 비교 검토하였다. 시스템의 응답에 영향을 많이 줄것으로 예상되는 제어대상의 주폴 (dominant pole) 2개 즉, 평면에서 단위원에 상대적으로 근접해 있는 폴 P_1 과 P_2 를 제어기의 제로로서 소거시킨 경우의 제어계수 비례 관계식을 사용하여 K_p 값이 7일때 계산된 K_i , K_d 값을 적용한 실험결과가 Fig.5 에 도시되어 있다. 샘플링 시간을 $T = 0.4$ ms 로 한 경우 K_d 값의 증가로 인해 타코미터의 잡음이 증폭되어 응답이 불안정하여졌고 이러한 잡음 증폭의 영향을 줄이기 위해 샘플링 시간을 4ms 로 증가시킨 실험결과 응답이

매우 안정되어졌고 응답 특성이 기존 조건과 거의 같은 양호한 결과를 얻었다. 이론적으로는 폴-제로 소거방법을 적용하면 제어기의 제로가 모두 제어 대상의 폴과 상쇄가 되므로 미분제어의 영향이 나타나지 않아야 하는데, 실제로는 샘플링 시간이 작을수록 타코미터의 잡음 증폭 영향이 크게 나타났다. 이는 오차 신호가 PID 제어 알고리즘에 의해 연산처리될 때 미분제어에 의한 영향으로 생각된다. 만약, 속도 측정기로 타코미터 대신 엔코더(encoder)를 사용한다면 출력 응답에 나타난 잡음이 거의 제거될 것으로 생각되므로 샘플링 시간을 증가시키지 않더라도 좀더 개선된 응답 특성을 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

앞장에서 기술된 데드비트제어기의 3가지 설계기법 중 최소모형응답(MPR)기법을 적용한 경우의 시스템 과도응답 특성이 Fig.6에 나타나 있다. 샘플링 시간이 적정치보다 작으면 상당히 큰 오버슈트가 발생하게 되는데 이의 감소는 샘플링 시간을 증가시켜 제어기 출력신호 $m(k)$ 의 크기를 줄임으로써 가능하다(2) 하지만 샘플링 시간을 너무 크게하면 그림에서 볼 수 있는 것처럼 상승시간이 길어지므로 최대오버슈트의 허용치와 상승시간을 감안하여 샘플링 시간을 선정하는 것이 바람직하다. 두번째로 무파형응답(RFR)기법을 적용한 경우의 응답특성이 Fig.7에 나타나 있다. MPR기법을 적용한 경우에도 샘플링과 샘플링사이에서 파형현상은 일어나지 않았지만 RFR 기법을 적용하였을 때, $T = 50 \text{ ms}$ 및 100 ms 에서 오버슈트가 현저히 줄어들었고 MPR 기법을 적용하였을 때 보다 상승시간이 빠른 좀더 개선된 응답 특성이 나타났다. 세번째로 최소 오차 응답(MER) 기법을 적용한 경우의 응답 특성이 Fig.8에 나타나 있다. 이 경우 $T = 50 \text{ ms}$ 에서도 오버슈트가 나타나지 않았으나 상승초기에 약간 처지는 응답 특성이 나타났고 $T = 100 \text{ ms}$ 에서 이 현상은 더욱 뚜렷해졌다.

이상적인 데드비트제어는 제어 대상의 폴과 제로가 정확히 소거되도록 제어기를 설계하였을 경우에만 얻을 수 있다. 그러나, 실제로는 제어 대상의 모델링 과정에서 근사화와 선형화로 인하여 제어 대상의 폴과 제로값에 불확실성이 내재하기 때문에 이론대로의 이상적인 데드비트제어를 얻기란 거의 불가능하다.(5) 특히 전기·유압 서보 시스템은 비선형이 크기 때문에 보다 정확하게 선형화된 수학적 모델이 요구된다.

Fig.9는 앞에서 언급한 각제어방법에 의한 시스템의 대표적 응답특성을 비교 도시한 것이다. PID 제어방법을 적용한 경우 데드비트제어방법(RFR기법)보다 약간의 오버슈트는 존재하나 상승시간이 좀더 빠른 양호한 응답 특성을 보여 주었다.

Fig.10은 PID 제어(기존조건) 방법을 적용한 경우 대한 컴퓨터 시뮬레이션 결과와 실험치 ($T = 0.4 \text{ ms}$)를 보여주고 있다. 시뮬레이션 결과는 실험치와 $t=t_r$ 부근에서 약간 상이한 것 외에는 전반적으로 잘 일치하고 있다. 선형화된 연속시간 모델과 이산시간 모델로 시뮬레이션한 결과는 실험치보다 약간 큰 오버슈트를 보여 주었으나, 비선형 연속시간 모델로 시뮬레이션한 결과는 실험치와 좀더 접근된 일치를 보여 주었다.

4.2 제어기하드웨어의 영향

MC68000은 Z-80A에 비해 워드길이 뿐만 아니라 클럭주파수가 2배로 크기 때문에 실시간 연산에 의한 시간 지연이 상대적으로 적다. 따라서, 시간지연영향을 배제하고 마이크로프로세서(CPU)의 워드길이 차이에서 오는 신호의 정량화 영향만을 검토하기 위하여 샘플링 시간(지연시간)을 4 ms 로 동일하게 설정하였고 A/D, D/A 변환기로 동일한 12비트용을 사용하였다.

PID 제어의 경우 Fig.11에서 볼 수 있는 것처럼 8비트(Z-80A) CPU를 사용한 경우의 시스템 응답은 16비트(MC68000) CPU를 사용한 경우의 것에 비해 오버슈트가 현격히 증가하고 진동이 많아진 특성을 보였다. 이는 두 경우가 4바이트(32비트) 고정소수점 방법으로 제어 알고리즘이 연산되었음에도 불구하고 연산과정과 제어신호를 내 보내는 과정에서의 정량화가 시스템의 성능에 상당히 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

Fig.12는 동일한 조건으로 데드비트제어를 적용한 경우에 CPU의 영향을 보여주고 있는데 Z-80A를 사용한 시스템의 응답은 MC68000을 사용한 결과에 비해 RFR 기법의 경우에는 약간 개선되었으나 전반적으로 데드비트 제어를 적용한 경우는 PID제어를 적용한 경우에 비해 CPU의 영향이 별로 나타나지 않았다. 이는 전자의 경우 제어 알고리즘의 연산이 비교적 간단한 반면 후자의 경우는 적분제어 알고리즘의 연산에서 정량화 오차가 누적되어 나타난 현상으로 사료된다.

Fig.13은 CPU로 MC68000($T=0.4 \text{ ms}$)을 사용하여 PID제어를 한 경우 두 종류의 변환기가 시스템의 과도응답특성에 미치는 영향을 보여주고 있다. 12비트 변환기를 사용하였을 때 시스템 응답이 과감쇠나 임계감쇠 특성으로 나타난 경우에 8비트 변환기를 사용함으로써 오버슈트가 증가 하였으나, 시스템 응답이 부족감쇠 특성으로 나타난 경우에는 8비트 변환기에 의해서 반대로 오버슈트가 감소하였다. 특히, $K_i = 250$ ($K_p = 4$, $K_d = 0.02$)인 경우 상승초기에 바람직하지 못한 응답 특성이 나타나고 있는데, 이는 적분제어계수가 커짐에

따라 변환기의 워드길이 가 짧을수록 정량화 오차의 누적이 증대되어 나타날 현상으로 생각된다.

이상의 제어기 하드웨어의 영향을 종합하여 보면 다음과 같다. 즉, 제어기로 최소한 16비트의 마이크로프로세서와 12비트의 A/D, D/A 변환기를 사용한 경우에만 시스템의 실제 응답이 이론적으로 예측된 응답 특성 (Fig.13 (a)의 아날로그제어 시뮬레이션 결과)과 같아지며, 이보다 짧은 워드길이를 가진 하드웨어를 사용한 경우에는 두 응답사이에 상당한 차이가 생겼다.

5. 결 론

- 1) PID제어에서 K_p 값의 제한된 증가는 시스템에 감쇠 효과를 주기 때문에 충분히 큰 K_i 값을 사용함으로써 양호한 응답을 얻을 수 있다. k_d 값의 증가는 시스템에 추가적인 감쇠를 주나 어느한도 이상이 되면 잡음이 증폭되어 오히려 응답이 불안정하여지고 이런 경향은 샘플링 시간이 짧을수록 심하여졌다.
- 2) PID제어에서 폴 제로 소거방법은 제어 대상의 폴이 제어기의 제로보다 많은 경우에도 제어계수를 선정하는데 편리하고 좋은 방법임을 확인할 수 있었다.
- 3) 무파형 응답 기법에 의해 설계된 데드비트제어를 적용한 경우, 시스템 응답이 양호하였으나 PID제어를 적용한 경우에 비해 상승시간이 조금 느리게 나타났다.
- 4) 컴퓨터 시뮬레이션 결과는 실험치와 잘 일치 하였으며 비선형 연속시간 모델이 가장 정확하였다.
- 5) 제어기로 최소한 16비트 마이크로프로세서와 12비트 A/D, D/A 변환기를 사용한 경우에만 시스템의 실제 응답과 같아지며, 이보다 짧은 워드길이를 가진 하드웨어를 사용한 경우에는 신호의 정량화에 의한 오차로 인해 두 응답사이에 상당한 차이가 생겼다.

6. 참고문헌

- 1) E.K. Kafriksen, " Industrial Robots and Robotics", Prentice Hall (1984)
- 2) C.Lee, " Microprocessor-based Controller for the Intelligent Robot System ", Proc. of 13th ISIR (1983)
- 3) H.E. Merrit, " Hydraulic Control System ", John Wiley (1967)
- 4) W.J. Thayer, " Transfer Functions for MOOG Servovalves ", MOOG Technical Bulletin 103 (1965)

- 5) B.C. Kuo, " Digital Control System ", HRW (1980)
- 6) J.R. Ragazzini, " Sampled-Data Control System ", McGraw-Hill (1958)
- 7) K.Isermann, " Digital Control System ", Springer-Verlag (1977)

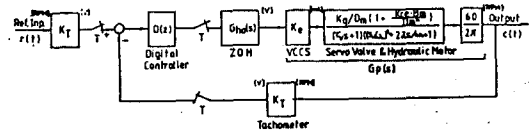


Fig. 1 Block diagram of an electro-hydraulic velocity control system

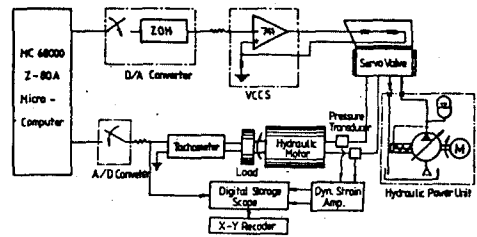


Fig. 2 Schematic of experimental apparatus

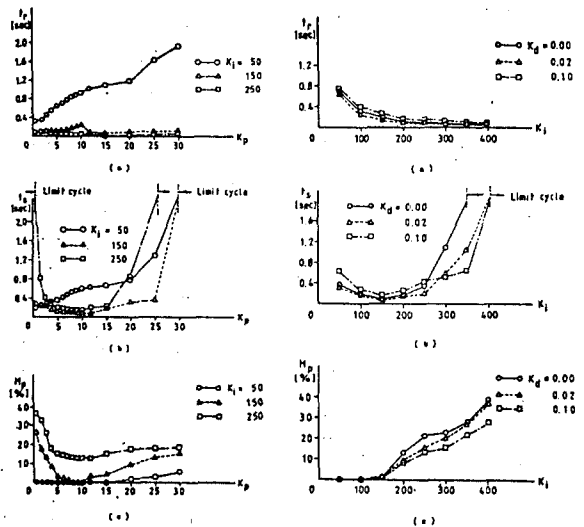


Fig. 3 Effects of K_p on transient-response characteristics with PID controller ($K_d=0.02$)

Fig. 4 Effects of K_1 on transient-response characteristics with PID controller ($K_p=5$)

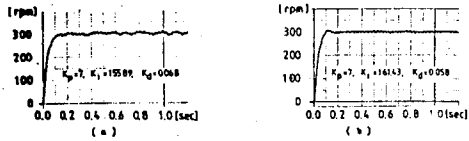


Fig. 5 Step responses of the system with PID controller by the pole-zero cancellation design (P_1, p_2 cancelled)

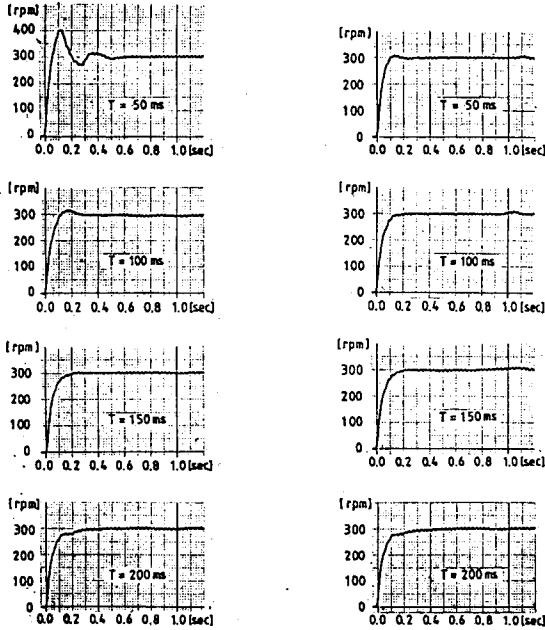


Fig. 6 Step responses of the system with deadbeat controller (NFR design)

Fig. 7 Step responses of the system with deadbeat controller (NFR design)

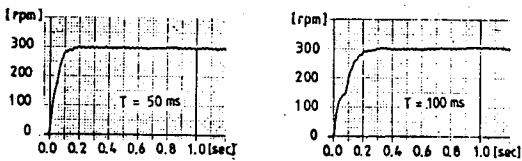


Fig. 8 Step responses of the system with deadbeat controller (MER design)

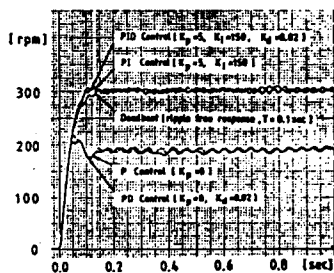


Fig. 9 Step responses of the system with PID and deadbeat controllers

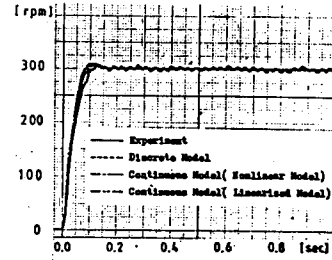


Fig. 10 Predicted and experimental step-responses of the system with PID controller ($K_p=5, K_i=150, K_d=0.02, T=0.4$ ms)

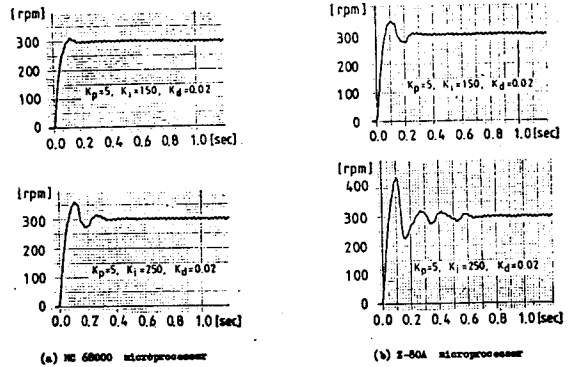


Fig. 11 Step responses of the system with PID controller ($T=4$ ms, 12-bit ADC, DAC)

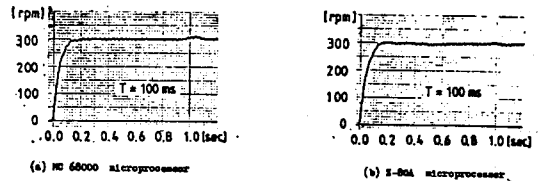


Fig. 12 Step responses of the system with deadbeat controller (12-bit ADC, DAC)

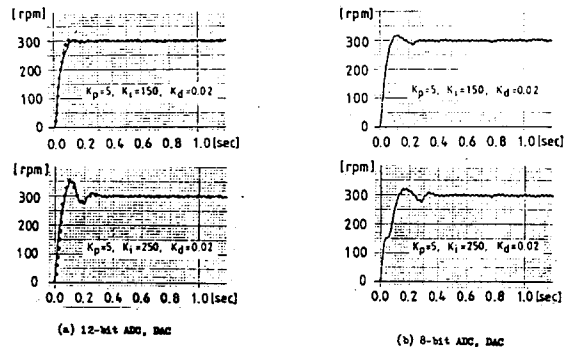


Fig. 13 Step responses of the system with PID controller ($T=0.4$ ms, MC68000 micro)