

## 서보 시스템을 위한 간단한 제어기 보드의 구현

崔光淳<sup>\*</sup>, 李鎔求<sup>\*</sup>, 嚴基煥<sup>\*</sup>, 孫東高<sup>\*\*</sup>  
\* 동국대학교 전자공학과 \*\* 유한전문대 전자과

### Implementation of Simple Controller Board for the Servo System

Kwang-Soon Choi<sup>\*</sup>, Yong-Gu Lee<sup>\*</sup>, Ki-Hwan Eom<sup>\*</sup>, Dong-Seol Son<sup>\*\*</sup>  
\* Dong-Guk Univ. Dept. Electronic Eng. \*\* Yu-Han College Electronics.

#### Abstract

This dissertation realized the simple digital controller board using  $\mu$ -PD 70320 microprocessor has characteristics that are low cost, simple hardware organization, convenient and interchangeable with the 8086 for the servo system.

We gave the control algorithm such as PD control, Self tuning adaptive control and Fuzzy control to the realized controller board and made a new real number data type for a high accuracy control. Users can select of suitable for the control algorithm. In the result of simulation and experiment shown a good performance.

#### I. 서 론

근래의 정보화, 자동화 시대에서 서보시스템은 정보기기, 산업기기, 가정용기기 등에 많이 사용되고 있다. 서보시스템의 사용자가 원하는 응답을 얻기 위하여 그사이 제어 기술자들은 제어기 설계에 많은 노력을 하여 있으며 마이크로 프로세서의 발달로 간단한 보드에 의한 컴퓨터제어가 가능하여졌다. 또한 제어방식도 PID제어, 적응제어, 퍼지제어 등 여러가지 방식들이 제공되고 있으나 사용자가 쉽게 임의의 방식을 자유롭게 택할수는 없었다.[1,2]

특히 마이크로 일렉트로닉스와 반도체 산업의 발달에 따라 저렴하고, 고속인 마이크로프로세서가 계속 등장하므로, 종래의 아날로그 방식 이었던 서보제어기는 디지털화로 바꾸어지고 있으며 회로 방식도 전용회로, 마이크로프로세서 방식, DSP(Digital Signal Processor)방식 등 다양한 요구에 대응하고 있다.[3]

디지털제어 시스템은 주로 컴퓨터와 프로세서를 이용하여 실현하며, 제어대상의 파라미터가 변하여도 이를 추정하는 알고리즘을 이용하므로 변동의 영향을 거의 받지 않으며, 소프트웨어의 변경이 용이하고 복잡한 제어기를 설계할 때 추가적인 하드웨어 없이 소프트웨어적으로 해결 할 수 있다. 그러나 신호를 디지털화 하는데 오차가 발생하며, 빠른 계산을 요구하는 경우 고급언어로 실시간 실현이 어렵고, 설계가 복잡한 문제점도 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 최근에는 DSP를 사용하는것이 효과적이나 이를 이용한 설계기술은 매우 복잡하여 기술적으로 많은 어려움이 있고 가격도 비싼 편이다.

본 논문에서는 서보시스템을 위하여 간단한 디지털 제어기 보드를  $\mu$ -PD 70320 마이크로프로세서를 사용하여 구현한다.

$\mu$ -PD 70320 마이크로프로세서는 가격이 저렴하고, 여러 가지 주변소자(Interrupt Controller, Timer, Comperator, Port 등)들이 내장되어 있어 하드웨어의 구성이 간편하여 사용하기가 편리하고, 8086과 호환이 되어 프로그램을 PC용 컴파일러로 구현이 가능하다.[5] 그러나 일반적으로 마이크로프로세서는 기본적으로 정수의 연산만을 지원하므로 실수의 연산은 Co-Processor나 이를 연산할 수 있는 코드가 필요하다. 그러므로 제안한 범용 디지털 제어기 보드에서는 Co-Processor를 사용하지 않고 보다 정밀한 제어를 위하여 정밀도가 매우 큰 세로운 실수 데이터 형(data type)을 만들어 제어 알고리즘에 포함되는 모든 연산을 수행하게 한다. 제어 방식으로는 PD제어, 자기동조 적응제어, 퍼지제어 알고리즘을 실현하여 사용자가 제어대상의 필요에 따라 소프트웨어 상에서 선택하여 사용하게 한다. 설계된 범용 디지털 제어기 보드를 가동 코일형 선형 직류 전동기[6]를 제어대상으로 시뮬레이션과 실험을 통하여 유용성을 확인한다.

#### II. 제어 알고리즘

제어알고리즘을 위해 사용된 가동 코일형 선형 직류 전동기의 수학적 모델은 식(1)과 같다.[6]

$$\begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -\frac{1}{T} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ K_m \end{bmatrix} V \quad (1)$$
$$T = \frac{R M}{K_e K_f}, \quad K_m = \frac{1}{K_e}$$

여기서  $X_1$ 은 MN-LDM의 출력인 거리,  $X_2$ 는 속도를 나타내는 상태변수이고,  $R, M, K_e, K_f$ 는 각각 가동자 코일의 저항, 질량, 가동 코일형 선형 직류 전동기의 역기전력상수, 추력상수를 나타낸다.

#### 1. 추종 특성을 개선한 PD 제어기

PD 제어기의 추종 특성을 개선하기 위하여 피드포워드 제어기를 추가하는 PD 제어기를 설계한다. 식(1)을 선형 2차

미분방정식으로 정리하면 식(2)로 된다.

$$\frac{T}{K_m} \dot{X}_1 + \frac{1}{T} \ddot{X}_1 = V \quad (2)$$

여기서  $\dot{X}_1$ 과  $\ddot{X}_1$ 은 LDN의 가속도 및 속도를 나타낸다.

원하는 기준 가속도 및 속도를  $\dot{X}_{1r}$ 과  $X_{1r}$ 로 정의하고 식(2)에 대입하면 식(3)의 피드포워드 제어기  $V_H$ 가 된다.

$$V_H = \frac{T}{K_m} \dot{X}_{1r} + \frac{1}{T} \ddot{X}_{1r} \quad (3)$$

시스템모델 (1)의 PD형 피드백제어기  $V_B$ 는 식(4)로 된다.

$$V_B = K_p(X_{1r} - X_1) + K_v(X_{2r} - X_2) \quad (4)$$

여기서  $K_p$ ,  $K_v$ 는 설계될 비례, 미분 피드백 상수이다.

오차  $e$ 를 식(5)로 정의하고

$$e = X_{1r} - X_1 \quad (5)$$

식(5)를 식(4)에 대입하여 정리하면 식(6)의 오차 동적 방정식(error dynamic equation)이 된다.

$$\ddot{e} + \frac{K_m}{T} \left( \frac{1}{K_m} + K_v \right) \dot{e} + \frac{K_m}{T} K_p e = 0 \quad (6)$$

식(6)에 대한 2차 오차 특성방정식(error characteristic equation)은 식(7)과 같다.

$$s^2 + \frac{K_m}{T} \left( \frac{1}{K_m} + K_v \right) s + \frac{K_m}{T} K_p = 0 \quad (7)$$

이것의 표준형 오차 특성방정식은 식(8)과 같으므로 특성방정식의 근이 s-plane 좌반평면에

$$s^2 + 2\zeta w_n s + w_n^2 = 0 \quad (8)$$

존재하도록  $\zeta$ 와  $w_n$ 을 선택하면 (6)의 오자는  $\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = 0$  가 된다.

식(7)과 (8)에서  $K_p$ 와  $K_v$ 를 구하면 다음과 같다.

$$K_p = \frac{T}{K_m} w_n^2 \quad (9)$$

$$K_v = \frac{T}{K_m} \left( 2\zeta w_n - \frac{1}{T} \right) \quad (10)$$

## 2. 퍼지제어기

MC-LDN의 위치 제어를 위한 퍼지제어기는 퍼지화, 지식베이스, 제어규칙부, 퍼지추론, 비퍼지화로 구성된다. 퍼지화는 시스템의 출력과 기준입력을 비교하여 오차와 오차의 변화량을 퍼지제어기의 입력으로 이용하고, 이값은 실수값이므로 아래의 그림 1과 같이 7개로 구성된 퍼지집합(NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB) 중 인접한 2개의 퍼지집합에 0~1 사이의 소속도를 가진다.

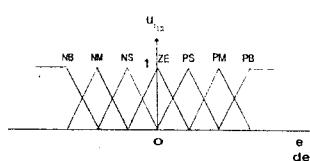


그림 1. 제어규칙에서 사용된 퍼지집합의 소속함수

Fig. 1 Membership functions for fuzzy sets used in the control rules

제어규칙부에서는 4입력 1출력 형태의 퍼지제어규칙을 이용하며, 퍼지제어에서 사용된 퍼지제어규칙은 표 1과 같다.

표 1. 퍼지제어기에서 사용된 퍼지제어규칙

Table 1. Fuzzy control rules used in the Fuzzy Logic Control

e	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
de	NB	NB	NB	NB	NM	NS	ZE
NM	NB	NB	NM	NM	NS	ZE	PS
NS	NB	NM	NM	NS	ZE	PS	PM
ZE	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
PS	NM	NS	ZE	PS	PM	PM	PB
PM	NS	ZE	PS	PM	PM	PB	PB
PB	ZE	PS	PM	PB	PB	PB	PB

퍼지추론은 Mamdani 가 제안한 minimum-maximum 연산을 이용하여 퍼지추론을 하고, 비퍼지화 방법으로는 무게중심법을 이용한다.

## 3. 자기동조적응제어기

설계한 제어기는 평가지수 항 안에 미분동작과 적분동작을 추가시켜 이 평가지수가 제어입력신호에 대해 최소화하도록 설계하고, 플랜트의 매개변수는 최소 반복 자승 알고리즘에 의거하여 추정하여 설계된 제어기로 보내어지는 자기동조적응제어기를 설계한다.

식(1)을 샘플링 간격  $T$ 로 이산화하면 식 (11)과 같은 이산화모델로 되고,

$$y(k+1) = \hat{a}_1 y(k) + \hat{a}_2 y(k-1) + \hat{b}_0 u(k) + \hat{b}_1 u(k-1) \quad (11)$$

여기서,  $y(k+1)$ 과  $u(k)$ 는 각각 k번째 샘플링 시간에서 가동 코일형 선형 직류 전동기의 위치와 입력 전압을 나타낸다.  $\hat{\cdot}$ (<sup>^</sup>) 기호를 갖는 매개변수는 이산화 과정에서 직접 계산되지 않고, 식 (12)의 최소 반복 자승 알고리즘에 의해 계산된다.

$$\begin{aligned} a_1(k) &= a_1(k-1) + \frac{1}{T} \phi^T(k-1) \phi(k-1) - [y(k) - \hat{a}_2 y(k-1)] \phi(k-1) \\ a_2(k) &= \frac{1}{T} \phi^T(k-1) \phi(k-1) - \frac{1}{T} \phi^T(k-1) \phi(k-1) \phi^T(k-1) \phi(k-1) \\ &\quad + \frac{1}{T} \phi^T(k-1) \phi(k-1) \phi^T(k-1) \end{aligned} \quad (12)$$

$$(0 \leq k \leq k-1, 0 \leq j \leq 2, T \neq 0)$$

$$\phi^T(k-1) = [y(k-1), y(k-2), u(k-1), u(k-2)]$$

$$\phi(k-1) = [a_1(k), a_2(k), b_0(k), b_1(k)]$$

추정된 매개변수를 이용하여 설계하는 제어기는 아래와 같다. 미분동작과 적분동작이 추가된 평가지수는 식 (13)과 같다.

$$I^*(u) = \{s(k+1) - s(k)\}^2 + q\{[s(k+1) - s(k)]^2 + p[s(k+1) - s(k)]\} \quad (13)$$

여기서  $I^*(k)$ 는 오차의 적분항이며,

$V(k) = V(k-1) + y^d(k) - y(k)$ 로 되며,  $y^d(k+1)$ 은 원하는 선형 직류 전동기의 위치를 나타낸다.

제어입력신호에 대해 최소화하도록 설계한 적응제어기는 식 (14)으로 된다.

$$u(k) = \frac{b_1(k)}{b_0(k)} + r \{ (1-p)s^2(k+1) + pI^*(k) - c(a_1(k) - q)s(k) \\ - c(a_2(k))s(k-1) + b_1(k)u(k-1) \} \quad (14)$$

여기서,  $c=1+q+p$ 이다.

### III. 시스템 구성

#### 1. $\mu$ -PD 70320 마이크로 프로세서

$\mu$ -PD 70320 마이크로 프로세서의 내부에는 초기의 8086 보다 빠른 실행 속도를 가지는 CPU 부가 있고, 타이머 유니트, DMA 유니트, 인터럽트 콘트롤러, 직렬통신 유니트, 병렬포트 그리고 커퍼레이터가 붙어 있는 8bit 병렬포트가 내장되어 있어 전제적으로 크기가 작아지며 사용하기가 쉽다. 또한 8086과 명령어 레벨에서 호환되어 되어 PC용 커퍼레이터로 프로그램을 작성하여 PC에서 시뮬레이션을 하고 시뮬레이션 한 프로그램을 제어기 보드에 바로 이식하여 쓸 수 있는 장점이 있다.

CPU는 ALU, ABM, DCL등의 장치로 구성되고, 내부 16비트의 아키텍처를 채택하고 있다. 특히 포트가 내장되어 있어 직접 외부와의 인터페이스가 가능해 하드웨어의 부피가 작아질 수 있으며 커퍼레이터가 있는 포트의 경우 직접 아날로그 신호를 받아 들일 수 있다.

$\mu$ -PD 70320의 내부 구조는 그림 2와 같다.

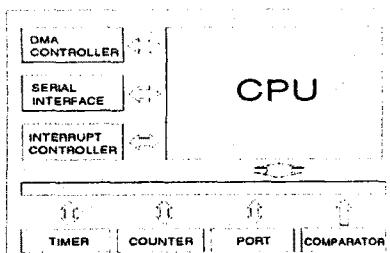


그림 2.  $\mu$ -PD 70320 내부 구조도

#### 2. 제어기 보드의 설계

$\mu$ -PD 70320를 사용하여 간단한 제어기 보드를 설계하고 이에 대한 블럭선도는 그림 3과 같다.

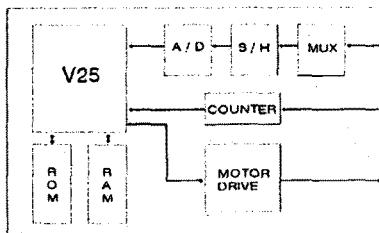


그림 3. 제어기 보드 블럭선도

그림 3에서 A/D 변환기는 8bit의 분해능을 가지고 있고 아날로그 MUX를 사용하여 8입력을 가질수 있으며 PWM방식의 모터 구동부는 최대 2A를 훌릴수 있는 L298을 사용하여 바로 모터에 연결 하여 모터를 구동할 수 있게 하여 최소한의 하드웨어로 서보제어가 가능해 제어기의 크기가 작아질 수 있다.

일반적으로 제어 알고리즘은 실수를 사용하여 표현하고 계산 되므로 보통 부동 소수점 수의 산술연산이 필요하게 되나, 일반적인 마이크로프로세서는 곤란한 부동 소수점 데이터의 산술논리를 해결하기 위해 새로운 부동소수점 수의 데이터 타입과 이를 연산할 수 있는 실행 코드를 만들어 준다. 이로 인해 일반적인 마이크로프로세서로 정수 연산으로만 제어를 하던것보다 정밀한 제어를 할 수 있어 신뢰성이 향상되며 정수 연산보다 부동소수점수의 산술연산이 복잡하여 연산 속도가 저하 되는 것은 뻬른 이셈블리어로 작성하여 속도의 저하를 어느정도 감소 할 수 있다.

### IV. 시뮬레이션 및 실험 결과

본 연구에 사용된 가동코일형 선형 쥐류 전동기의 전원전압은 6[V], 추력은 0.7[N], 가동자의 질량 0.03[kg], 가동자 코일의 저항 6.73[ $\Omega$ ], 역기전력 상수 1.5[V·s/m], 그리고 추력상수는 0.152955[Kgf/A]이다.

이를 이용한 실험장치의 구성도는 그림 4와 같다.

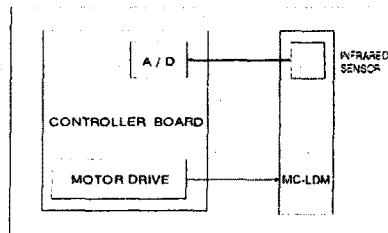
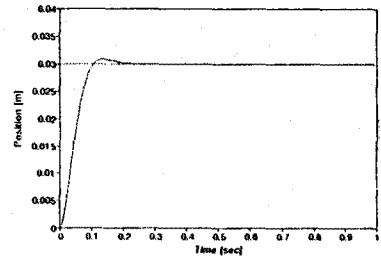


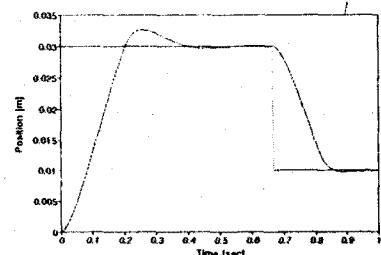
그림 4. 실험장치 블럭도

Fig. 4 Block diagram of experiment setup

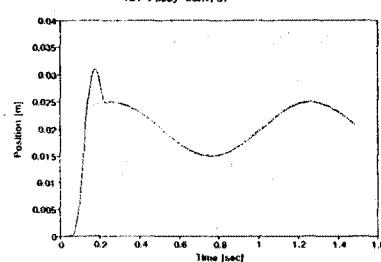
그림 5는 IBM PC-486 상에서 수행한 시뮬레이션 결과이며, 그림 6은  $\mu$ -PD 70320 마이크로프로세서를 사용하여 설계 구현한 제어기 보드를 이용하여 실험한 결과이다.



(a) PD 제어  
(a) PD control



(b) 퍼지제어  
(b) Fuzzy control



(c) 자기동조적제어  
(c) Self-tuning adaptive control

그림 5. 시뮬레이션

Fig. 5 Simulation

## 참 고 문 헌

- [1] A. Brickwedde, "Microprocessor-Based Adaptive Speed and Position Control for Electrical Drives", *IEEE Trans. Industrial Appli.*, vol. IA-21, no. 5, pp. 1154-1161, September 1985.
- [2] M. A. El-Sharkawi, Siri Weerasooriya, "Development and Implementation of Self-Tuning Tracking Controller for DC Motors," *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol. 5, no. 1, pp. 122-128, 1990.
- [3] Michael F. Hordeski, "Control System Interface", Prentice-Hall, PP. 183-249, 1992
- [4] R. JHONSTON, "FUZZY LOGIC CONTROL", *GEC JOURNAL OF RESEARCH*, VOL. 11, NO. 2, PP. 99-109, 1994.
- [5] NEC Cooperation, " $\mu$ -PD 70322/70332 User's Manual", 1988
- [6] Brough and Joseph I., "An Introduction to The Linear DC Motor", *Electronics & Power*, vol. 20, no. 15, pp. 628-632, 1974

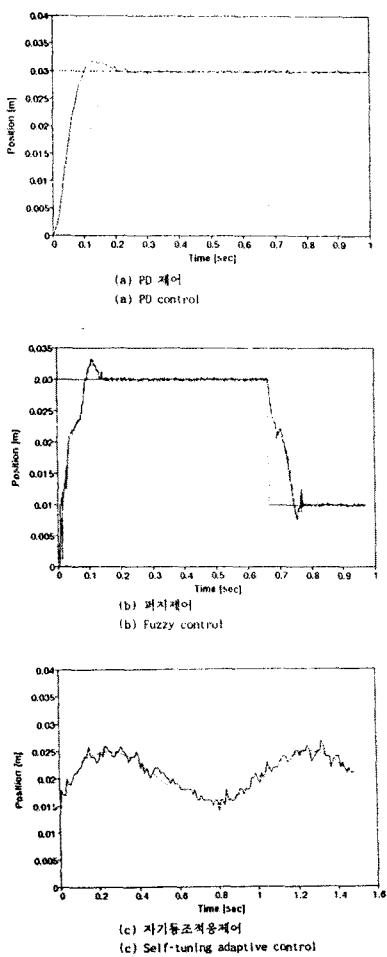


그림 6. 실험

Fig. 6 Experiment

시뮬레이션 결과와 비교할 때 실험 결과는 비교적 비교적 좋은 특성을 보이고 있으며 이 실험 결과로 보아 제안된 제어기는 제어대상의 시스템 모델이 비교적 정확한 경우에 PD 제어, 시스템 모델이 부정확하거나 파라미터가 알려지지 않은 시스템의 제어에는 퍼지제어, 자기동조적응제어 알고리즘을 사용하여 좋은 제어특성을 얻을 수 있다.

## V. 결 론

서보시스템을 위하여 간단한 디지털 제어기 보드를  $\mu$ -PD 70320 마이크로프로세서를 사용하여 구현 하였다. 구현한 디지털 제어기보드는 가격이 저렴하고, 하드웨어 구성이 간단하여 사용하기가 편리하고, 8086과 호환성이 있어 프로그램을 PC용 컴파일러로 구현이 가능하다. 실수연산은 Co-processor를 사용하지 않으면서도 보다 정밀한 제어를 위해 새로운 실수 데이터 형을 만들어 제어 알고리즘에 포함되는 모든 연산을 수행하게 하였다.

범용성을 주기 위하여 제어방식으로는 PD제어, 자기동조적응제어, 퍼지제어 알고리즘을 실현하여 사용자가 제어대상의 필요에 따라 소프트웨어 상에서 선택할 수 있게 하였다. 선형 직류 전동기를 제어대상으로 시뮬레이션 및 실험을 통하여 본 제어기보드의 고신뢰성, 소형화, 고정밀성을 확인하였다.