

마이크로프로세서를 이용한
디지털 제어기에 관한 연구

*이은철 김낙교 남문현
전국대학교 공과대학 전기공학과

A STUDY ON THE MICROPROCESSOR-BASED
DIGITAL CONTROLLER

Un-Cheol, Lee Lark-Kyo, Kim Moon-Hyon, Nam
Dept. of Electrical Eng., Kon-Kuk Univ.

ABSTRACT

A digital controller for a discrete-data control system can take many forms. For example, they can be passive RC networks, general purpose digital computers, special purpose of mini-computer, and delay lines. With the recent advent of the microprocessor, its use as a digital controller is evident.

This work discusses the hardware and software development of a microprocessor-based digital controller for a discrete-data control system. A second-order, Type 1 system is implemented on an analog computer; a Intel 80-286 microprocessor is used to implement the controller; and, output response are obtained for step, ramp, and parabolic inputs.

The results demonstrate that the microprocessor has potential as a digital controller. Finally, a brief discussion on the results indicate possible areas of improvement of the controller and future investigation.

I. 서론

최근, 제어분야에서의 마이크로컴퓨터 및 마이크로 프로세서의 응용이 급진전 되고 있다. 각종 산업공정 제어 및 산업장비의 계속제어 분야에서 현대 제어이론의 광범위한 제어 방법을 복잡한 하드웨어에 의존하지 않고 종래의 아날로그 제어를 보다 고도화시키고, 논리 연산을 통합시킬 수 있으며, 프로그램의 융통성이 풍부하고, 소형이면서도 저렴한 가격의 전용 프로세서에 의한 전 시스템의 디지털화, 소프트웨어화가 추진되고 있다.

본 논문은 전체시스템의 전달함수나 다양한 형태의 입력에 대한 시스템 응답과 관련이 있으며, 본 제어 시스템에서의 입력은 계단입력, 경사입력, 포물선 입력에 따라 분류할 수 있다. 이러한 분류는 다양한 오차상수의 크기에 반영된다. 정상상태 오차의 크기에 따른 개별적 입력들은 시스템의 장점으로서 작용할 수 있다.

오차상수를 고려한 하나의 실행기준을 보통 "최소(minimal) 또는 "데드비트(dead beat)" 응답이라고 부른다.

데드비트 응답의 설계기준은 첫째, 특정의 목표 입력 신호에 대해 샘플링 순간에 정상상태 오차는 0이다. 둘째, 정상상태에 도달하기까지의 시간으로 정의되는 응답을 최소로 한다. 셋째, 디지털 제어기 D(z)는 물리적으로 실현이 가능해야 한다. 즉, 데드비트 응답은 설계에 의한 극영점의 상쇄가 완전히 행해지는 이상적 조건에서 얻어진다.

본 논문의 목적은 이산-데이터 제어 시스템에 있어 마이크로프로세서를 이용한 디지털 제어기의 성능을 검증하고, 특성을 개선해 보고자 한다.

II. 주어진 연속 플랜트에 대한 디지털 제어기의 함수 유도

영 정상상태 오차와 세기의 입력 즉 계단, 경사, 포물선입력 중 하나에 대한 응답에서 최소의 유한 정착시간을 갖는 리플이 없는 출력 응답을 구하기 위해서는 디지털 제어기가 필요하다. 이러한 기준은 "리플이 없는 최소 응답" 이라고 알려져 있다. 각 입력에 대한 디지털 제어기 설계는 문헌에서 찾아 볼 수 있다. 그러나 계단입력에 대한 디지털 제어기의 설계는 경사 또는 포물선입력에 대한 최소 응답기준을 만족하지 못하며, 마찬가지로 경사입력에서의 최소 응답기준을 구하기 위한 디지털 제어기 설계는 계단입력 또는 포물선입력에 대한 최소 응답기준을 만족하지 못한다. 그리고 포물선 입력에 대한 최소 응답을 구하는 디지털 제어기 설계는 계단 또는 경사입력에 대한 응답기준을 만족하지 못하게 된다.

각기 분리한 디지털 제어기 전달함수 D(z), 세기의 각 입력을 통해서 주어진 최소한의 리플이 없는 응답으로 유도할 수 있다. 각각의 이러한 전달함수는 마이크로프로세서의 소프트웨어에 저장한다. 마이크로프로세서는 입력의 형태를 결정하고, 입력의 형태를 토대로 실제 요구한 응답을 구하는데, 연속 플랜트에 D(z)함수를 적용한다.

만일 보상이면 디지털 제어기가 전항경로에 위치한다면 임펄스 전달함수는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$M(z) = \frac{D(z) Gp(z)}{1+D(z) Gp(z)} \quad \text{----- (1)}$$

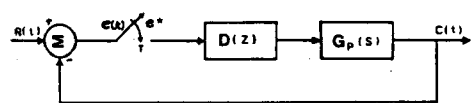


그림1. 전항경로에 디지털 제어기가 있는 단위 피드백 이산-데이터 시스템

디지털 제어기 전달함수는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$D(z) = \frac{1}{Gp(z)} = \frac{M(z)}{1-M(z)} \quad \text{----- (2)}$$

여기서 $M(z)$ 는 전체 시스템함수, $C(z)/R(z)$ 이다. 즉 $G_p(z)$ 는 보통 미리 결정하고, $M(z)$ 와 $1-M(z)$ 의 함수 선택을 위한 방법만을 요구한다. Kuo[2], Raggazini[7] 등의 문헌에서는 주어진 플랜트 전달함수의 $M(z)$ 와 $1-M(z)$ 를 결정하기 위한 방법을 설명하고 있다. 이러한 문헌에서의 방법은 각각의 세가지 입력에 대한 $D(z)$ 를 유도하는데 사용된다.

$G_p(z)$, $M(z)$, $1-M(z)$ 의 값을 구하여 식(2)에 대입하면 디지털 제어기의 전달함수를 구할 수 있다.

$$D(z)_{step} = \frac{4.538 - 2.038z^{-1}}{1 + 0.435z^{-1}} \quad (3)$$

$$D(z)_{ramp} = \frac{2.2008 + 17.005z^{-1} - 8.80z^{-2}}{1 + 0.726z^{-1} - 1.726z^{-2}} \quad (4)$$

$$D(z)_{para} = \frac{18.417 - 29.518z^{-1} + 16.907z^{-2} - 3.309z^{-3}}{1 - 1.293z^{-1} - 0.414z^{-2} + 0.707z^{-3}} \quad (5)$$

III. 이론적 고찰

1. 개요

본 논문의 디지털 제어기는 미국 Intel 사의 80-286 마이크로프로세서를 사용하였으며, 본 제어 시스템에 필요한 부속장치는 가산 증폭기, 인버터, 레벨시프터, 샘플-홀드드, 적분기 등이다.

그림2는 기능적인 시스템 구성도를 나타낸 것이다. 연속 플랜트는 아날로그 컴퓨터를 만들어 도의 실험하였고, 그 출력은 인버팅 증폭기를 통해서 네가티브 피드백 한다. 피드백한 값은 가산 증폭기로 입력되고, 여기서 입력 $R(t)$ 와 합해진다. 가산 증폭기의 반전된 출력은 A/D 변환기로 들어간다.

A/D 변환기는 연속적으로 병렬 2진화 시킨 14bit의 데이터로 나타낸 오차신호를 제공하게 된다. 소프트웨어를 통해서 시간 지연을 시키고, 변환된 $E(t)$ 값은 매 0.01초로 샘플링하고, 입력 $R(t)$ 형태로 바꾸기 위한 서브루틴으로 공급한다. 그리고 0.04초의 전체 시스템 샘플링비는 인텔 80-286 마이크로프로세서의 소프트웨어를 가지고 제어할 수 있다.

마이크로프로세서에서 적절한 $D(z)$ 는 $R(t)$ 의 형태나 또는 계단입력, 경사입력, 포물선입력에 따라 선택할 수 있다. 선택한 $D(z)$ 는 서브루틴으로서 RAM에 저장하여 여러가지 계산을 수행하거나, $E^*(t)$ 를 간략화하고 오차신호를 샘플링한다. 즉, $R(t)$ 의 형태를 결정하게 되는 것이다. 간략화한 오차신호는 D/A 변환기를 통해서 출력하게 된다. 이 출력은 제어신호 $H^*(t)$ 로서 연속 플랜트를 제어하는데 사용한다.

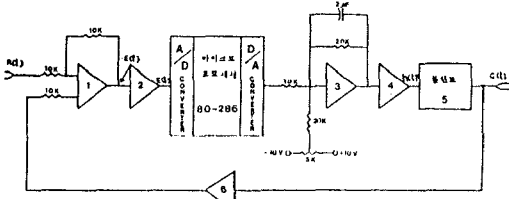


그림2. 전체 시스템 구성도

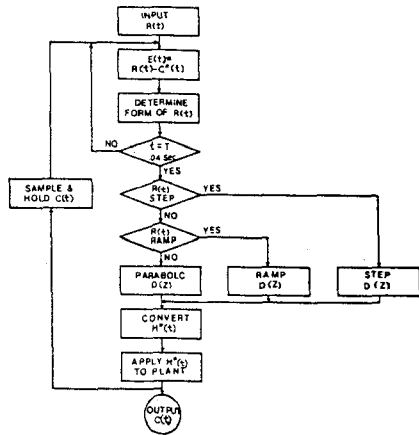


그림3. 시스템 동작 흐름도

2. R(t)의 형태 결정 방법

그림 4는 $R(t)$ 의 형태를 결정하기 위한 흐름도로서 이 것에 의해 적절한 $D(z)$ 를 선택하게 되는 것이다.

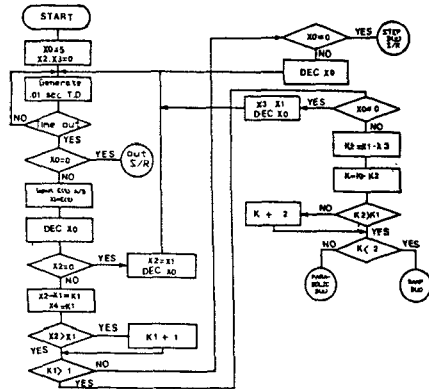


그림4. 시간지연, R(t)결정에 관한 흐름도

3. D(z)의 실행 및 변환

$D(z)$ 의 실행은 직접 프로그래밍 방법을 사용하였다. 이 방법은 전달함수의 분자와 분모의 다항식 요소를 구할 수 없을 때 사용하게 된다. 또한 직접 프로그래밍 방법은 방대한 양의 계산이 가능하며, 더욱이 이 방법은 병렬 또는 반복적인 프로그래밍 방법보다는 마이크로프로세서를 이용할 때 연속적으로 적절하게 제어를 할 수 있다는 장점을 가지고 있다.

그러나 이 방법은 보다 많은 메모리를 요구하며, 보다 큰 차수의 시스템에 대한 메모리공간 제한의 문제가 따르는 것이 단점이다.

디지털제어기의 전달함수 $D(z)$ 는 두 개의 다항식 비로서 다음과 같은 일반적인 형태로 표현할 수 있다.

$$D(z) = \frac{H(z)}{E(z)} = \frac{a_0 + a_1z^{-1} + a_2z^{-2} + \dots + a_nz^{-n}}{b_0 + b_1z^{-1} + b_2z^{-2} + \dots + b_mz^{-m}} \quad (6)$$

b.는 0이 아니다 라는 조건에서 성립된다. 여기서 m과 n은 양의 정수이다. b.이상에서 하나는 0이라고 하자. 헛식을 고차 급셈하면 다음과 같은 결과를 구할 수 있다.

$$H(z) (1+b_1z^{-1}+b_2z^{-2}+\dots+b_mz^{-m}) = E(z)(a_0+a_1z^{-1}+\dots+a_nz^{-n}) \quad (7)$$

$$h^*(t) + \sum_{k=1}^m b_k h^*(t-kT) = \sum_{k=0}^n a_k e^*(t-kT) \quad (8)$$

$$h^*(t) = \sum_{k=0}^n a_k e^*(t-kT) - \sum_{k=1}^m b_k h^*(t-kT) \quad (9)$$

$$x^*(t) = \sum_{k=0}^n a_k e^*(t-kT) \quad (10)$$

$$y^*(t) = \sum_{k=1}^m b_k h^*(t-kT) \quad (11)$$

$$h^*(t) = x^*(t) - y^*(t) \quad (12)$$

그림 5에는 계단 D(z)에 대한 흐름도를 나타내었다. E(t)값을 절댓값으로 변환시켜야 하는데 그 이유는 입력 R(t)가 포지티브와 네가티브 값을 포함하기 때문이다. 포지티브 오차전압은 A/D 변환기 최상위 비트(MSB)가 0이면 네가티브이고, 1이면 포지티브이다.

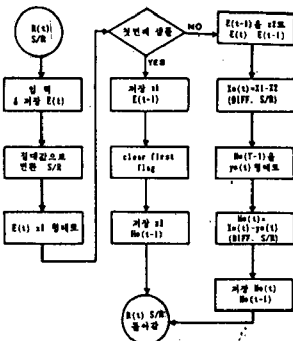


그림 5. 계단 입력 D(z) 흐름도

IV. 실험결과 및 고찰

그림 1-6은 앞에서 설계한 디지털제어기 D(z)에 계단입력, 검사입력, 포물선입력을 적용했을 때, 시스템의 출력응답을 나타낸 것이다. 실행오차신호는 마이크로프로세서 디지털제어기에 의해서 조정되며 제어기의 출력도 마찬가지로이다.

이러한 설계의 목적은 오버슈트가 거의 없거나, 또는 영정상상태오차 2차계 1형 시스템에서의 유한한 정착시간을 갖는 출력을 구하는 데 있다.

본 논문의 연구는 계단입력, 검사입력, 포물선입력에 대한 디지털 제어기를 설정한 것이다. 만일 입력이 3차라고 하면 D(z) 함수는 미리 지정하여 포물선으로 인식하게 된다. 3차 입력은 실행해 볼 수 없었지만, 미래에는 고차계 입력이 가능한 시스템 응답을 실험해 볼 수 있을 것이다.

본 논문의 실험결과와 그래프에서의 실행오차신호는 주어진 입력신호와 샘플과 오출드된 출력신호가 피드백된 값과의 차이이다.

실행오차신호는 A/D 변환기의 입력과 디지털 제어기에서 발생한다. 이오차는 입력신호와 출력응답 사이의 차이이다.

그림 1은 계단입력에 대한 출력응답이다. 그래프로부터 볼 수 있는 바와 같이, 이 결과에는 사실상 오버 슈트가 존재하지 않는데, 이 그림은 0.8정도의 제동비에서 2차계 시스템의 응답을 보여주고 있는 것이다.

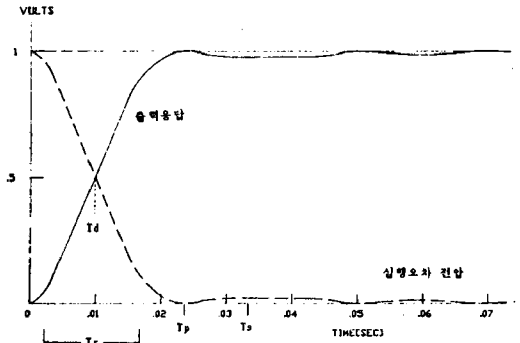


그림 1. 계단입력에서의 출력응답

실질적으로는 실행오차 전압이 0으로 가지 않고, 10mV의 정상상태 값 주위에서 존재하는 것을 알 수 있다. 이처럼 작은 실행오차 전압은 D(z)함수 형태일 때 이동(shifting)과 합(summing)에서 A/D 변환과 절사화(truncation) 오차와 관련된 최소분해능 또는 양자화 오차의 조합에 원인이 있다. 실제 정의된 오차는 매우 작다.

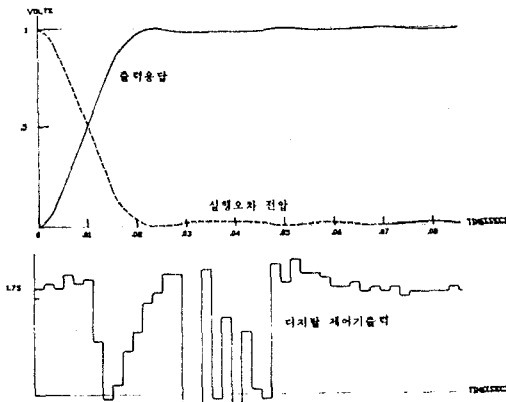
A/D변환기에 영 입력일 때 디지털 제어기의 출력값은 1.6[V]이다. 제어기의 출력은 실행오차 신호가 떨어질 때까지 증가하고, 실행오차 신호가 급하게 변화하는 응답에서 매우 급하게 제어기 출력 위치에서 스위칭한다. 그 제어기 출력은 실행오차 신호가 정상상태 값에 가까워질 때 특성적 "난조" (hunting)가 나타난다. 이 현상은 이산 시스템과 관련된 양자화에 원인이 있다고 생각할 수 있다. 오차는 매우 작다.

디지털 제어기 출력의 또다른 예는 그림 3에 나타난다. 이것은 0.5[V] 계단입력이 온-오프 스위치할 때 제어기 출력이다. 명목상 영 입력 제어기 출력은 거의 1.6 [V]에 가깝다.

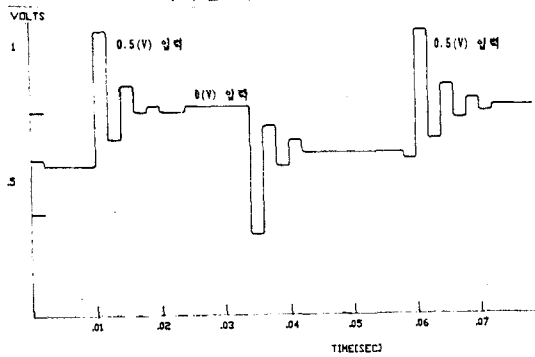
A/D변환기에서의 보정은 0[V] 입력으로 플랜트에 적용 하고, 레퍼시프터를 통해서 바꿀 수 있다. 그림 2,3 에서의 샘플링 주기(0.04 sec)의 동작은 제어기의 출력 에서 관찰할 수 있었다.

그림 4는 검사입력에서의 출력응답이다. 이 그래프는 입력이 8[V]까지 올라가는 출력을 볼 수 있다. 실행 오차 신호는 0.01[V]가 피크이고, 0.1초 후에 0[V] 가까이 떨어진다. 출력응답은 갑자기 검사입력에 도달하지 못하고 거의 0.25[V]의 한정한 속도오차로 나타난다. 한정한 속도오차는 잠깐동안 사라지고, 입력과 출력이 같은 속도로 움직이는 것 같지만, 한정한 위치는 다르다. 정상상태 오차는 램프입력에서 1형 시스템의 오차와 일치한다.

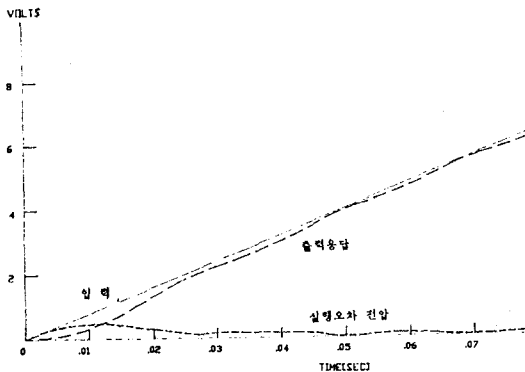
디지털 제어 시스템은 시스템 내부에 디지털 변환기 및 디지털 제어기를 갖고 있으므로 디지털이라고 부르지만 그 응답 및 출력은 여전히 연속변수 t의 함수이다.



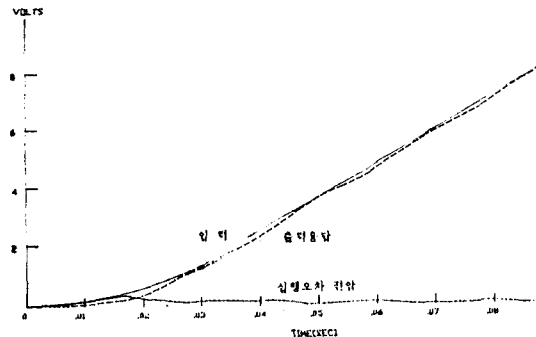
그레프2. 계단입력에 대한 출력응답과 디지털 제어기 출력



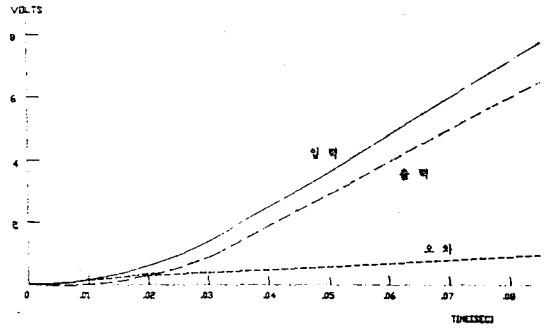
그레프3. 0과 0.5(V) 입력의 디지털제어기 출력



그레프4. 경사입력에 대한 출력응답



그레프5. 포물선입력에 대한 출력응답



그레프6. 포물선입력에서의 경사 $D(z)$ 출력

시스템 구성과 파라미터가 동일한 경우, 디지털 제어 시스템이 연속지 제어시스템보다 안정하지 못하다. 디지털 시스템의 성능은 샘플링 주기 T 에 의존한다. 일반적으로 샘플링 주기가 커지는 경우에는 계단응답의 오버슈트가 커지게 되고, 샘플링 주기가 너무 클 경우에는 시스템이 불안정해진다.

V. 결론

본 연구에서는 이산-데이터 제어시스템에 대한 디지털 제어기로서 마이크로프로세서의 성능을 검증하고, 동특성을 개선해 보고자 한 것이다.

리플이 없는 최소의 응답은 계단입력에서 얻을 수 있었고, 리플이 거의 없는 근사한 응답은 경사입력과 포물선입력을 통해서 얻었다. 영 정상 상태 오차는 계단입력에서 구할 수 없었는데, 이것은 이산 시스템에 나타나는 양자화(quantization), 절사화(truncation)오차가 원인이다.

본 논문은 단일 샘플링비를 사용하여 단일 2차계 1형 시스템에서 실험한 것이다. 미래에는 서로 다른 샘플링비를 사용하여 다양한 시스템에서 실험해보는 것이다. 주어진 시스템 및 입력에 대한 샘플링비는 받아들이는 출력의 샘플링비에서 상하한선을 제한하는 것으로 변화해 갈 것이다.

다양한 플랜트, 또는 프로세서를 갖는 복잡한 시스템에서는 A/D변환기 또는 멀티플렉서, 하드웨어 인터럽트 및 메모리를 사용하므로 하나의 마이크로 프로세서에 의한 제어가 가능할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] Cadzow, James A., Discrete-Time System, Prentice-Hall, Inc., Englewood cliffs, N.J., 1973, pp.256-258
- [2] Kuo, Benjamin C., Discrete-Data Control System, Science Tech, Champaign, Illinois, 1974, pp.324-327
- [3] Hanselman H., Implementation of Digital Controllers- A Survey, Automatica, vol. 23, No.1, pp.7-32, 1987
- [4] Houpis C.H. and Lamont G.B., Digital Control System, McGraw-Hill, 1985
- [5] 高橋安人, Digital Control, 岩波書店, 1985
- [6] Gene F. Franklin and David Powell J., Feedback Control of Dynamic Systems, Addison, Wesley, 1986
- [7] Ragazzini, John R. and Franklin, Gene F., Sampled-Data Control Systems, McGraw-Hill Book, Company, Inc., 1968, pp.148-153