

DSP 를 이용한 고속 범용 제어기의 구현과 응용

Design of a High-Speed Universal Controller Using DSP and Its Application

°박준영*, 이성욱*, 박주이*, 장평훈**

* 한국과학기술원 기계공학과 (Tel : +82-42-869-3266; Fax : +82-42-869-5226; E-mail : asura@cais.kaist.ac.kr)

** 한국과학기술원 기계공학과 (Tel : +82-42-869-3226; Fax : +82-42-869-5226; E-mail : phchang@mecha.kaist.ac.kr)

Abstracts A universal controller is designed using a DSP (digital signal processor). The design objectives of the system are to implement control algorithms that require a lot of calculations and to develop a convenient user-interface environment. To demonstrate the efficiency of the system, the time delay control algorithm is implemented for the 2 D.O.F. SCARA type robot and the experimental results are presented.

Keywords DSP, Controller, Time Delay Control, C Code Generation

1. 서론

선형 시불변 제어에 대한 제어는 그 계의 수학적 모델이 잘 알려져 있을 경우에 고전적인 선형 제어 기법에 의하여 잘 해결될 수 있다. 그러나, 실제 제어 응용의 경우, 제어 어떤 매개 변수들은 추정하기 어려운 경우가 많으며 시간에 따라 변화하거나 비선형적인 특성을 지니기도 한다. 이로 인하여, 고전적 선형 제어기는 잘 작동할 수 있는 범위에 있어서 제한이 따르게 된다. 이러한 잘 모르는 선형 계나 비선형 계의 제어를 위하여 몇 가지 현대적 제어 기법이 개발되었는데, 그 예로는 큰 이득에 의한 강인 제어 기법[1], H_{∞} 제어 기법[2], 적응 제어 기법[3], 슬라이딩 모드 제어 기법 (Sliding Mode Control)[4] 등이 있으며, 최근에 제안된 시간 지연 제어 기법 (TDC : Time Delay Control)[5]이 있다.

이러한 현대적인 제어 기법을 실제 플랜트에 실시간으로 구현하는데 있어서의 문제점은 제어기에 사용되어지는 프로세서에 대해 고속의 처리 기능을 요구한다는 점이다. H_{∞} 제어 기법은 선형, 설계된 제어기의 차수가 고차이기 때문에 많은 계산량이 요구되고, 적응 제어 기법은 실시간으로 매개변수를 추정해야 하며, 슬라이딩 모드 제어 기법에서는 실시간으로 비선형 동역학을 계산하여야 한다. 또한, 시간 지연 제어 기법의 경우에는 효과적인 시간 지연 추정을 위해서 빠른 표본 시간(sampling time)이 요구된다. 그러므로 상기한 현대 제어 이론의 실제 구현을 가능하게 하기 위해서는 고속의 제어기가 필요하다.

이러한 고속 처리 기능의 요구 조건을 만족하는 다양한 프로세서가 전자공학의 비약적 발전으로 인하여 개발되어지고 있다. 그 중에서 DSP(Digital Signal Processor)는 신뢰성 있는 프로세서로서, 근래 가장 많이 쓰이고 있고 지속적으로 개발되어지고 있으며, 제어 분야에서 다양한 연구와 실험에 많이 사용되어지고 있다. 특히, 메카트로닉스 시스템에 많이 사용되어지고, 디스크 드라이브 등 다양한 제품에도 사용되어지고 있다.

본 논문에서는 전술한 장점을 가진 DSP를 사용하여, 여러 가지 제어 이론을 다양한 플랜트에 손쉽게 적용할 수 있는 범용 제어기를 구현하였다. 개발된 범용 제어기는 표준의 입출력 디바이스들을 장착하여 다양한 플랜트에 하드웨어적으로 간편하게 연결할 수 있게 하였으며, 사용하기에 편리한 GUI(Graphic User Interface)를 MS-Windows 95 운영체제하에서

구축하였다.

또한, 범용 제어기의 소프트웨어와 제어 기법의 모의실험에 많이 사용되는 MATLAB 소프트웨어와의 통합으로 더 나은 개발환경을 구축하였다. 즉, 사용자는 설계된 제어 법칙을 MATLAB/SIMULINK 상에서 블록선도의 형태로 표현하도록 하였으며, 이렇게 표현된 제어 법칙은 자동으로 DSP에서 실행 가능한 형태의 코드로 변환되어 다운로드, 실행, 실험 결과의 저장 등이 일목요연하게 수행되어진다. 실험 결과는 MATLAB의 M 파일 형태로 저장되어 MATLAB에서 바로 분석 가능하도록 하였다.

2. 하드웨어의 구성

하드웨어의 전체적인 구성은 그림 1 과 같다.

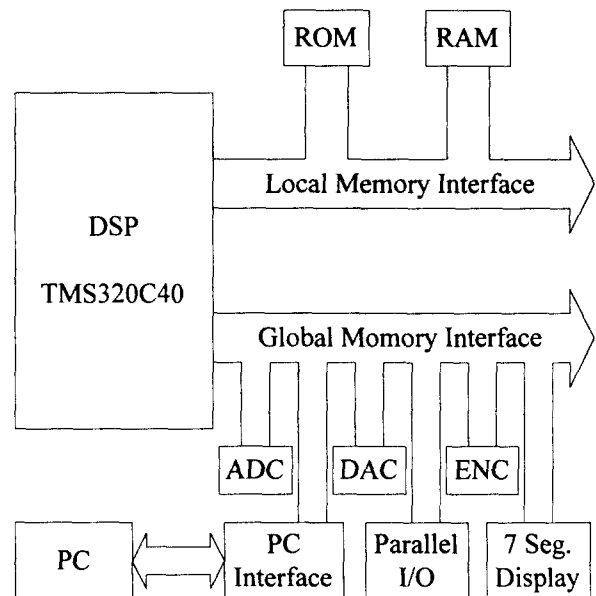


그림 1. 하드웨어의 구성
Fig. 1 Structure of Hardware

DSP로는 텍사스 인스트루먼트(TI)사의 TMS320 계열 중에서

성능이 우수한 TMS320C40 [6]을 선택하였다. TMS320C40에는 local memory interface, global memory interface라는 두 개의 external interface를 가지고 있고, 각 memory interface에는 서로 다른 속도를 갖는 메모리를 제어하기 쉽도록 두 개의 독립적인 strobe 제어선을 가지고 있다. 사용자는 각각의 제어선이 제어할 수 있는 메모리 영역을 정해줄 수 있다.

Local memory interface에는 ROM(Read Only Memory)과 RAM(Random Access Memory)을 장착하였고 global memory interface에는 A/D Converter, D/A Converter, 위치센서인 엔코더의 정보를 읽기 위한 카운터 회로, 외부장치 제어를 위한 Parallel I/O, PC와의 데이터 통신을 위한 인터페이스 회로, 변수값이나 보드의 진행상황을 표시하는 7 segment display를 장착하였다.

하드웨어를 각 모듈별로 설명하면 다음과 같다.

TMS320C40 (40MHz)의 주요 특징은 다음과 같다.

- 50ns instruction cycle times
- 275 MOPS (millions of operations per second), 320 Mbytes/s
- 16 Gbyte continuous program/data/peripheral address space
- Four sets of memory-control signals support different speed memories in hardware
- 512 byte instruction caches
- 8 Kbytes of single-cycle dual access program or data RAM

ROM은 27C256 EPROM을 4개 사용하여 32K x 32 bits의 저장 능력을 갖게 했으며, DSP 보드의 OS를 저장하고 있다. RAM은 KM681001칩을 8개 사용하여 256K x 32 bits의 저장능력을 갖게 했으며, PC에서 작성한 제어프로그램의 다운로드나 실험 결과 데이터의 저장에 사용되어진다. RAM은 24000개 x 8 변수의 실험 결과 데이터 저장 능력을 가진다.

A/D Converter는 입력 전압 $\pm 10V$, 12 bits의 resolution(1 LSB : 4.88mV), conversion time 8 μs 인 AD7876칩을 사용하였으며, 5 채널을 설치하였다.

D/A Converter는 입력전압 $\pm 10V$, 12 bits의 resolution(1 LSB : 4.88mV), conversion time 3 μs 인 AD DAC80N칩을 사용하였으며, 3채널을 설치하였다.

Encoder Counter는 24 bits의 카운터, DC to 20MHz count frequency, 4채배 모드가 가능한 LS7166칩을 사용하였으며, 3채널을 설치하였다.

Parallel I/O는 외부장치로부터 신호를 받거나, 외부장치로 제어신호를 보낼 수 있도록 8bits의 입력과 8bits의 출력을 가진다.

PC 인터페이스는 사용자가 PC에서 작성한 제어 프로그램을 DSP 보드의 램으로 다운로드, DSP보드에 저장된 실험 결과 데이터를 PC로 전송, PC와 DSP 보드간의 신호 전송의 기능을 갖도록 설계되어졌다.

7 segment display는 원하는 특정 변수의 값이나 데이터를 7 segment display에 출력하여 사용자가 확인할 수 있도록, 또는 DSP 보드의 실행 진행상황을 사용자가 알 수 있도록 하기 위해 설치되었다.

3. 소프트웨어의 구성

소프트웨어의 전체적인 구성은 그림 2와 같다.

소프트웨어는 그림 2에서 보듯이 전체적으로 네 가지 부분으로 나뉘어진다. 이 중 PC측 프로그램은 윈도우즈 95 환경에서 실행될 수 있도록 윈도우즈 프로그래밍을 했다. 사용한 프로그래밍 언어는 Microsoft Visual C++ version 1.5이다.

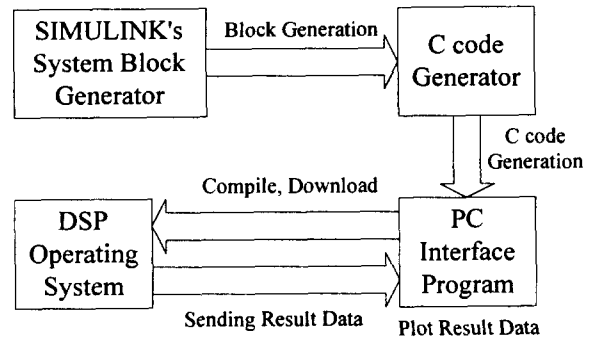


그림 2. 소프트웨어의 구성
Fig. 2 Structure of Software

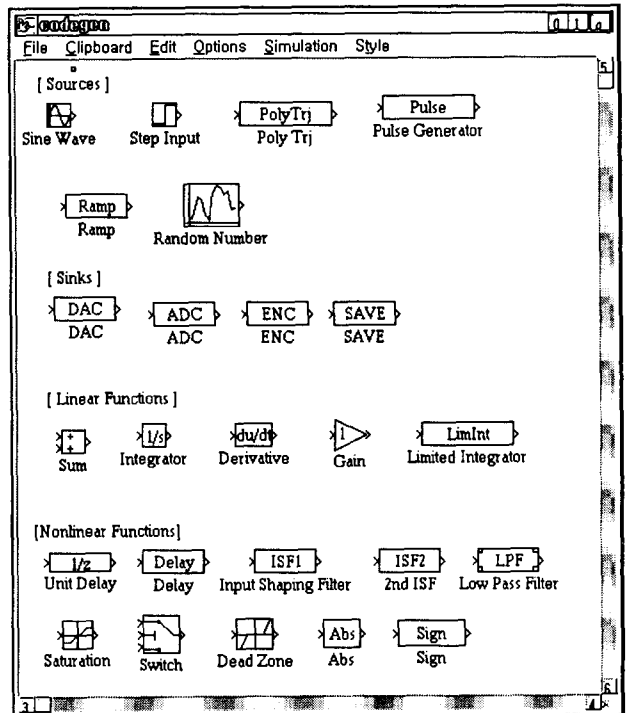


그림 3. 시스템 블록 다이어그램 생성기
Fig. 3 Block Diagram Generator for System

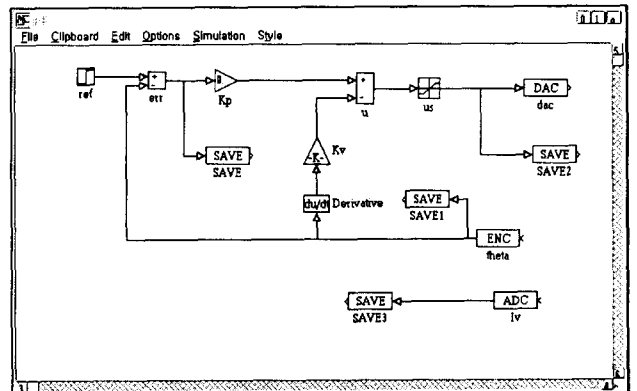


그림 4. 생성된 시스템 블록 다이어그램의 예
Fig. 4 Example of Generated Block Diagram for System

MATLAB의 SIMULINK에서 시스템 블록 다이어그램 생성기를 실행시키면 그림 3과 같은 윈도우가 뜬다. 사용자는 윈도우 안의 블록들을 선택하여 원하는 시스템의 블록 다이어그램을 그림 4의 예처럼 생성한다.

블록 다이어그램을 생성후 C 코드 생성기 프로그램을 실행시키면 DSP용 C 프로그램이 자동으로 생성된다. PC Interface Program은 다음과 같은 기능을 갖는다.

- 자동으로 생성된 DSP용 C 프로그램의 컴파일.
- 컴파일된 실행파일을 DSP 보드의 다운로드.
- 다운로드된 프로그램의 실행하도록 명령함.
- 실험 결과로 발생하는 데이터를 DSP 보드로부터 PC로의 전송후 저장.
- 저장된 실험 결과를 화면에 그래프의 형태로 출력.

실험결과는 MATLAB의 M-file로 저장하여 MATLAB에서 사용 가능하게 하였다.

DSP 보드의 기본적인 OS(Operating System)는 TMS320C40용 어셈블리어로 작성했으며, PC로부터 전송되는 프로그램을 DSP 보드의 램(RAM)으로 다운로드, RAM에 다운로드된 프로그램의 실행 및 실행 중지, 프로그램 실행으로 인한 실험결과의 저장 및 PC로 전송의 기능을 갖는다.

사용자가 작성한 제어 프로그램의 실행 알고리즘은 다음과 같다. DSP에는 내부 TIMER가 있는데, 이 내부 TIMER로 하여금 사용자가 지정한 표본주파수(sampling frequency)로 인터럽트(interrupt)를 발생시키도록 한다. 이 인터럽트 발생 시마다 RAM에 다운로드된 제어 프로그램이 실행된다. 실험 결과로서 얻어지는 데이터는 PC로 전송을 위해 RAM에 저장된다.

또한, 사용자가 DSP 보드의 각 구성요소 즉, ADC, DAC, Encoder counter, Parallel I/O, 7 segment display를 쉽게 사용할 수 있도록 C 함수루틴을 만들어서 라이브러리화하였다. MATLAB/SIMULINK의 시스템 블록 다이어그램 생성기를 사용하지 않는 경우 이 C 함수 라이브러리를 이용하여 원하는 시스템의 제어를 위한 DSP용 C 프로그램을 직접 작성할 수 있다.

4. 실험

실험에 사용된 플랜트는 2 D.O.F SCARA type 로봇이다. 1, 2축의 액추에이터로는 DC 서보 모터가 사용되었고, 위치센서로는 인크리멘탈 타입의 엔코더가 사용되었다.

각 축에 관절레벨에서 위치제어를 수행하는데, 제어 기법으로서 시간 지연 제어 기법이 사용되었다. 이때, 시간 지연 제어 기법의 제어 입력과 계인은 다음과 같다.

- 제어 입력 :

$$u = \bar{M}(\ddot{\theta}_d + K_v \dot{E} + K_p E) + u(t-L) - \bar{M}\ddot{\theta}(t-L)$$

여기서 $E = \theta_d - \theta$ 이고, L 은 시간지연으로서 본 실험에서는 표본 시간(sampling time interval)과 같게 하였다.

- 제어기 계인 :

1 축 : $\bar{M} = 0.001, K_v = 80, K_p = 400$

2 축 : $\bar{M} = 0.0006, K_v = 120, K_p = 900$

이 제어기에 대해 시스템 블록 다이어그램 생성기를 이용하여 블록 다이어그램을 그린 것이 그림 5이다. 이 블록 다이어그램은 C 코드 생성기에 의해 자동으로 DSP용 C 프로그램으로 변환되어 컴파일, 다운로드 및 실행될 수 있다.

범용 제어기에서 이 프로그램이 실행 가능한 최대 표본주파수(sampling frequency)는 15KHz이었으며, 본 실험은 1KHz로 수행하였다. 그림 6 과 그림 7은 각각 1, 2축이 30° 회전하도록

계단입력을 가하였을 때의 응답이다.

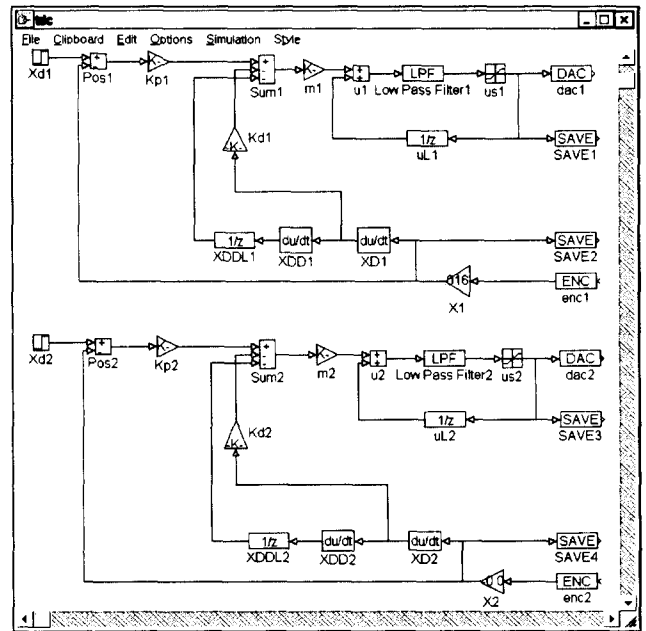


그림 5. SCARA type 로봇에 적용한 TDC의 블록 다이어그램
Fig. 5 Block Diagram of TDC for SCARA type robot

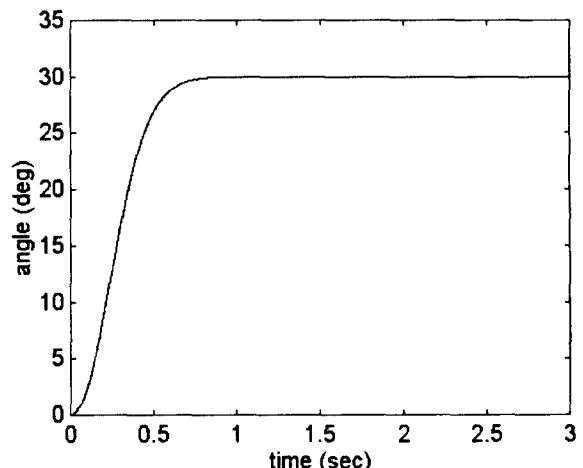


그림 6. SCARA 로봇 1축의 계단응답
Fig. 6 Step Response for joint 1 of SCARA type robot

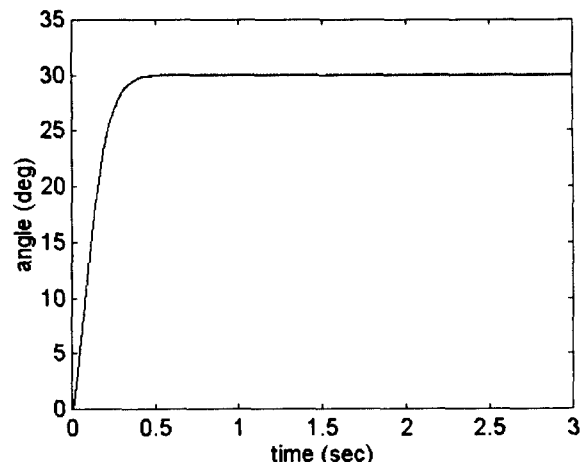


그림 7. SCARA 로봇 2축의 계단응답
Fig. 7 Step Response for joint 2 of SCARA type robot

5. 결론

본 논문에서는 고속 처리 기능을 가진 DSP를 사용하여 여러 가지 제어 이론을 다양한 플랜트에 손쉽게 적용할 수 있는 범용 제어기를 구현하였다. 또한, 범용제어기의 소프트웨어와 MATLAB 소프트웨어와의 통합으로 사용자에게 편리한 실험 환경을 구축하였다. 즉, MATLAB 소프트웨어에서 시스템 블록 생성기를 이용하여 설계한 제어기를 쉽게 범용 제어기에 적용하여 실험하고, 그 결과를 MATLAB에서 바로 분석할 수 있는 환경을 구축하였다.

개발한 범용제어기의 효용성을 보이기 위해 2축의 SCARA type 로봇에 시간 지연 제어 기법을 적용한 경우를 예로 보였으며, 좋은 실험 결과를 얻을 수 있었다.

참고 문헌

- [1] J. C. Doyle and G. Stein, "Multivariable Feedback Design : Concepts for a Classical / Modern Synthesis", *IEEE Trans. on Automatic Control*, vol. AC-26, pp.4-16, 1981.
- [2] J. C. Doyle, K. Glover, P. P. Khargonekar and B. A. Francis, "State-Space Solutions to Standard H_2 and H_∞ Control Problems", *IEEE Trans. on Automatic Control*, vol. 34, no. 8, pp. 831-847, August 1989.
- [3] R. Kelly, "A Linear State Feedback plus Adaptive Feedforward Control for DC Servo Motor", *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. IE-34, no. 2, pp. 153-157, May 1987.
- [4] J. -J. E. Slotine and S. S. Sastry, "Tracking Control of Nonlinear Systems Using Sliding Surfaces with Application to Robot Manipulators", *International Journal of Control*, vol. 38, no. 2, pp. 465-492, 1983.
- [5] K. Youcef-Toumi and O. Ito, "A time delay controller design for systems with unknown dynamics", *ASME J. Dynamic Systems Measurement and Control*, vol. 112, pp. 133-142, 1990.
- [6] *TMS320C4x User's Guide*, Texas Instruments