

# DSP 를 이용한 로봇의 그리퍼 제어장치의 개발

김갑순<sup>#</sup>

## Development of the Robot's Gripper Control System using DSP

Gab-Soon Kim<sup>#</sup>

### ABSTRACT

This paper describes the design and implementation of a robot's gripper control system. In order to safely grasp an unknown object using the robot's gripper, the gripper should detect the force of gripping direction and the force of gravity direction, and should perform the force control using the detected forces and the robot's gripper control system. In this paper, the robot's gripper control system is designed and manufactured using DSP(Digital Signal Processor), and the gripper is composed of two 6-axis force/moment sensors which measures the Fx force(force of x-direction), Fy force, Fz force, and the Mx moment(moment of x-direction), My moment, Mz moment at the same time. The response characteristic test of the system is performed to determine the proportional gain Kp and the integral gain Ki of PI controller. As a result, it is shown that the developed robot's gripper control system grasps an unknown object safely.

**Key Words** : Control system(제어장치), DSP(디지털 신호처리기), D/A converter(디지털/아날로그 변환기), Robot's gripper(로봇 그리퍼), 6-axis force/moment sensor (6 축 힘/모멘트센서)

### 1. 서론

로봇의 그리퍼(gripper)는 인공지능 로봇(intelligent robot)의 손을 완성하기 위해 국내외에서 계속해서 연구되고 있다. Ceccarelli<sup>1</sup>은 물체를 잡는 방향의 힘을 측정할 수 있는 단축 힘센서를 이용하여 로봇의 손가락을 제작하였고, 제작한 제어장치를 이용하여 그리퍼를 위치 및 힘제어함으로써 물체를 잡았다. Castro<sup>2</sup>은 단축 힘센서를 이용하여 조오 그리퍼(Jaw gripper)를 제작하고, 그것을 힘제어하여 물체를 잡았다. Nkgatho<sup>3</sup>은 그리퍼에 근접센서를 부착하고, 이것과 전자회로를 연결하여 지능 그리퍼(intelligent gripper)을 제작하였으며, 힘제

어로 물체를 안전하게 잡았다. Carlos<sup>4</sup>은 물체의 위치를 정확하게 찾을 수 있는 비전시스템을 이용하여 3 손가락 그리퍼 및 제어장치를 제작하였다.

이와 같은 그리퍼는 여러 방향의 힘과 모멘트를 동시에 측정할 수 없기 때문에 미지의 물체를 떨어뜨리거나 파손시키지 않도록 정확하게 잡을 수 없을 뿐만 아니라 미지의 물체가 손가락의 어느 위치에 있는지 정확하게 알 수가 없다. 로봇이 손가락을 이용하여 미지의 물체를 안전하게 잡기 위해서는 잡는 방향의 힘과 중력방향의 힘을 동시에 측정해야 하고, 이 값들을 이용하여 힘제어를 해야 한다. 그리고 물체를 잡은 이후에 다음 일을 정확하게 수행하기 위해서는 물체의 중심이 손가

접수일: 2005년 12월 29일; 게재승인일: 2006년 4월 14일

# 교신저자 : 경상대학교 제어계측공학과, ERI

E-mail gskim@gsnu.ac.kr Tel. (055) 751-5372

락의 어느 지점에 있는지를 알아야 하고, 이를 위해서는 모멘트  $M_x, M_y, M_z$  를 동시에 측정해야 한다. 그러므로 로봇의 그리퍼는 힘  $F_x(x$  방향의 힘),  $F_y, F_z$  과 모멘트  $M_x(x$  방향의 모멘트),  $M_y, M_z$  를 동시에 측정할 수 있는 6 축 로봇손가락 힘/모멘트 센서로 구성되어야 한다.

위에서 기술한 논문에서 로봇의 그리퍼는 중앙 처리장치(CPU : central processing unit)로 16 비트 마이크로프로세서(microprocessor)를 이용하여 제작된 제어장치 혹은 컴퓨터를 이용하여 힘제어 되었다. 마이크로프로세서를 이용하여 제작된 제어장치로 단축 힘센서(일방향 힘측정 센서)로 구성된 그리퍼를 제어할 때에는 힘센서의 출력신호가 하나이므로 이신호를 처리하는 속도가 충분하다. 그러나 본 논문에서와 같이 6 축 힘/모멘트센서를 이용하여 구성된 그리퍼의 제어는 6 개 센서의 출력신호를 순차적으로 처리해야 하므로 처리속도가 늦으므로 그리퍼의 응답이 늦게 되고 이에 따라 로봇의 기능을 발휘하지 못한다. 그리고 컴퓨터를 이용하여 그리퍼를 제어하면 실제 로봇에 적용하기가 매우 어렵다. 그러므로 로봇의 기능을 발휘하기 위해서는 신호를 빠른 속도로 처리할 수 있는 마이크로프로세서 종류(DSP)를 사용하여 로봇의 그리퍼 제어장치를 설계 및 제작해야 한다.

본 논문에서는 6 축 힘/모멘트센서의 출력을 빠른 속도로 처리하기 위하여 DSP(Digital Signal Processor : TMS320C32)를 이용한 로봇의 그리퍼 제어장치를 설계 및 제작하였으며, 그리퍼는 힘  $F_x, F_y, F_z$  과 모멘트  $M_x, M_y, M_z$  를 동시에 측정할 수 있는 2 개의 6 축 힘/모멘트센서로 구성하였다. 미지물체를 안전하게 잡을 수 있도록 PI 힘제어의 비례게인  $K_p$  와 적분게인  $K_i$  를 결정하였다.

## 2. 로봇의 그리퍼 제어장치

### 2.1 그리퍼 제어장치

Fig. 1 은 로봇의 그리퍼 시스템의 블록도를 나타낸 것이고, Fig. 2 는 본 논문에서 설계 및 제작한 제어장치와 기 개발된 그리퍼 시스템의 사진을 나타내고 있다. 그리퍼 시스템은 몸체(body), 그리퍼 제어기(gripper controller), 그리퍼 1(6-axis force/moment sensor 1), 그리퍼 2(6-axis force/moment sensor 2), 모터(motor) 및 모터 드라이브(motor drive), 근접센서(proximity sensor), 노이즈필터(noise filter)등

으로 구성되었다.

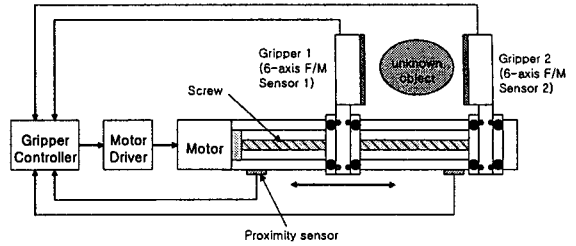
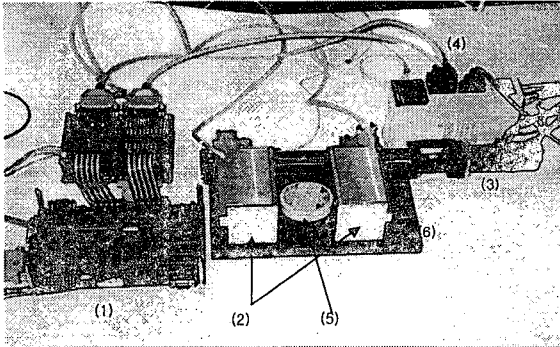


Fig. 1 Block diagram of robot's gripper control system

몸체는 스크루(screw), 그리퍼 1 과 그리퍼 2 의 고정판, 플렉시블 커플링, 베이스 등으로 구성되었고, 그리퍼 1 의 고정판 위에는 그리퍼 1 이 고정되며, 그리퍼 2 의 고정판 위에는 그리퍼 2 가 고정된다. 그리퍼 2 의 고정판은 스크루에 의해 좌우로 이동되고, 플렉시블 커플링은 모터의 축과 스크루의 축 사이를 연결하여 두 축 사이의 미소한 불일치로 인해 발생하는 모터축의 힘을 최소화하기 위해 사용되며, 베이스(base)는 그리퍼 1 과 2, 모터, 등을 지지한다. 그리퍼 제어기는 모터 드라이브에 펄스를 입력하여 모터를 정회전 혹은 역회전시키고, 이로 인해 이동용 그리퍼 2 가 좌우로 이동되며, 그리퍼 1 과 그리퍼 2 로부터 출력되는 신호를 받아 미지물체를 안전하게 잡기 위한 PI 힘제어를 한다. 그리퍼 1 은 6 축 힘/모멘트센서( $F_x, F_y, F_z$  힘센서와  $M_x, M_y, M_z$  모멘트센서)와 하우징으로 구성되었고, 미지물체를 안전하게 잡고 그리퍼 안에서 물체의 위치를 파악하기 위하여 사용되며, 그리퍼 시스템에 고정되었다. 그리퍼 2(6 축 힘/모멘트센서 2)는 그리퍼 1 과 같은 역할을 하며 미지물체를 잡기 위해 몸체의 스크루의 회전에 따라 좌우로 이동한다. 그리퍼 1 과 2 로 사용된 6 축 힘/모멘트센서는 Kim<sup>5</sup> 이 미지물체를 안전하게 잡기 위해 특별히 제작한 것이다.

모터 및 모터 드라이브는 그리퍼 제어기로부터 받은 펄스에 따라 몸체의 스크루를 정회전 및 역회전시키며, 근접센서(proximity sensor: 0048U)는 그리퍼들을 보호하기 위하여 이동용 그리퍼 2 가 그리퍼 1 혹은 몸체에 충돌하지 않도록 제어하는데 사용된다. 노이즈필터(noise filter: SN-E10F-CM)는 모터 및 모터 드라이브로부터 발생하는 노이즈가 그리퍼 제어기에 영향을 미치는 것을 차단하기 위하여 사용되었다.



(1) Gripper controller, (2) Gripper 1, 2(6-axis F/M sensor 1, 2)  
 (3) Motor, (4) Motor driver, (5) Unknown object, (6) Body

Fig. 2 Photograph of the developed robot's gripper control system

그리퍼 시스템이 미지물체를 안전하게 잡기 위해 다음과 같은 순서로 동작한다. 첫째, 그리퍼 제어기가 펄스를 모터 드라이브에 입력시키고, 모터 드라이브는 받은 펄스수만큼 모터를 정회전 혹은 역회전 시킨다. 둘째, 모터의 회전에 의해 스크루가 회전하게 되므로 그리퍼 2 고정판에 고정된 그리퍼 2 가 좌우로 이동하게 되어 미지물체를 잡거나 놓는다. 셋째, 그리퍼로 물체를 잡으면 그리퍼들을 구성하는 6 축 힘/모멘트센서들로부터 가해진 힘과 모멘트에 따라 신호들이 출력되고, 이 신호들은 그리퍼 제어기에 입력되어 미지물체를 잡기 위한 제어 혹은 그리퍼 안에서의 물체위치를 파악하는데 사용된다.

그리퍼 시스템을 이용하여 미지물체를 파괴시키지 않고 놓치지 않도록 안전하게 잡기 위해서는 그리퍼들을 이용하여 미지물체에 일정한 힘을 가해야 된다. 그러기 위해서는 그리퍼 제어기에서 출력되는 하나의 펄스에 의해 이동용 그리퍼 2 의 좌우 이동거리가 매우 작아야 되고, 6 축 힘/모멘트센서의 상호간섭오차가 매우 적어야 한다. 본 논문에서는 그리퍼 시스템의 기계적인 정밀정확도를 높이기 위하여 모터와 모터 드라이브는 각각 미쯔비시사(MITSUBISHI)의 HC-MF 13 와 MR-J2-10A 를 사용하였다. 모터의 정격회전수는 3000 rpm 이고, 펄스당 모터의 회전각도는 엔코더(encoder) 분해능이 8192 pulse/rev 이므로 0.04 이다. 그리퍼 2 를 이동시키는 스크루는 1 회전(360 )에 2 mm 이동한다. 따라서 그리퍼 제어기가 1 개의 펄스를 출력하면

이동용 그리퍼 2 는 0.2 mm 정도를 이동한다. 그리고 사용된 6 축 힘/모멘트센서는 상호간섭오차가 2 %이하로 매우 우수하므로 미지물체를 안전하게 잡거나 물체가 그리퍼의 어느 위치에 있는지를 파악하는데 정밀정확도를 높일 수 있다.

## 2.2 그리퍼 제어기

Fig. 3 는 그리퍼 제어기(gripper controller)의 블록도를 나타낸 것이며, Fig. 4 는 본 논문에서 개발한 그리퍼 제어기의 사진을 나타낸 것이다. 그리퍼 제어기는 DSP(digital signal processor), 메모리부(memory part), 어드레스 디코더(address decoder), 증폭기(amplifier), 신호 변환부(signal convert part), 통신 및 주변장치(communication and peripheral interface system)로 구성되었다.

DSP 는 오실레이터로부터 50 MHz 의 클럭을 받아서 동작되고, 빠른 명령처리를 위해 롬(EPROM)에 프로그래밍된 동작 프로그램을 램(SRAM)에 임시로 저장한 상태에서 각각의 명령을 처리하며, 저장된 어드레스 디코더(EPLD) 로직을 통하여 D/A 컨버터(DAC), A/D 컨버터(ADC), 병렬 인터페이스(8255A PPI), 직렬통신 인터페이스(8251A PCI) 등을 동작시킨다. 또한 모터 인터페이스 회로를 통하여 펄스를 모터 드라이브에 입력시켜 모터를 구동시킨다. D/A 컨버터는 모터를 DC 전압으로 구동시킬 때 사용되며, A/D 컨버터는 6 축 힘/모멘트센서로부터 출력되는 아날로그 신호를 디지털 신호로 바꾸기 위하여 사용된다. 그리고 병렬 인터페이스(8255A PPI)는 LCD 에 신호를 주기 위하여 사용되고, 직렬통신 인터페이스(8251A PCI)는 컴퓨터와 인터페이스 하기 위하여 사용된다.

DSP 는 32 bit 부동소수점 연산 방식, 수정된 하바드 구조(3 개의 내부 버스, 1 개의 외부 버스), 60 MHz 에서 30 MIPS, 60 MFLOPS, 330 MOPS 의 처리속도, 16/32 bit 의 프로그램용 및 8/16/32 bit 의 데이터용 외부 메모리 접속, 1632 Mbit 의 외부 확장 메모리 영역(24 bit 어드레스), 산술논리연산장치(ALU : arithmetic and logic unit)와 곱셈기를 사용하는 2 개의 명령을 단일 사이클로 실행할 수 있는 텍사스 인스트루먼트사(TI)의 고성능의 프로세서인 TMS320C32PCM50(50 MHz)를 사용하여 실시간 제어가 가능하도록 하였다.

메모리부는 롬(EPROM : Erasable/Programmable

Read Only Memory)과 램(SRAM : Static Random Access Memory)로 구분된다. 롬(M27C512)은 그리퍼 제어기를 동작시키기 위한 프로그램을 저장하는 역할을 하며, 이것의 용량은 64 kbyte 이다. 램(KM68256)은 데이터를 임시로 저장하는 역할 혹은 고속처리를 위한 프로그램을 저장하는 역할을 하며, 32 kbyte 용량의 램이 4 개가 사용되었다.

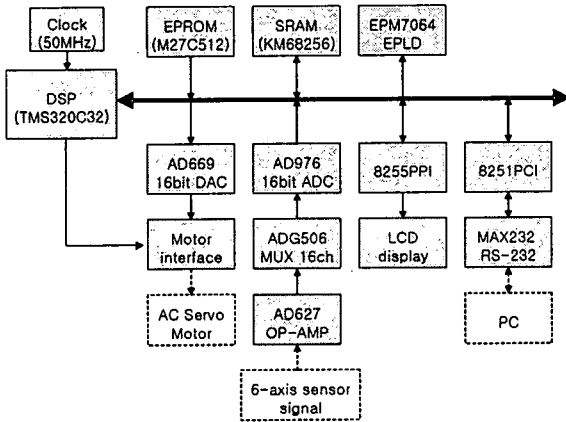


Fig. 3 Block diagram of the robot's gripper controller

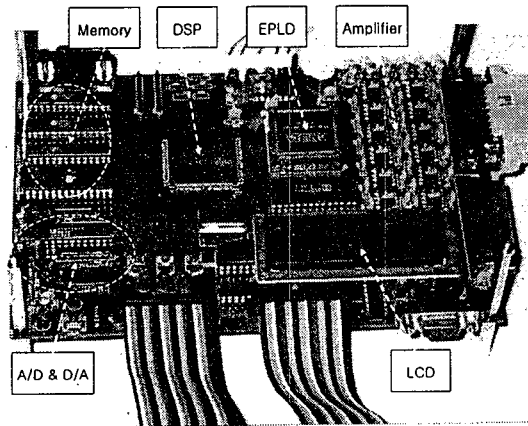


Fig. 4 Photograph of the developed gripper controller

증폭기는 6 축 힘/모멘트센서의 출력신호가 최대 0.5 mV/V 로 매우 미세하므로 이 아날로그 신호를 디지털로 변환할 때의 정밀도 향상을 위하여 약 1000 배정도 증폭하기 위해 사용되고, 사용된 증폭기는 아날로그 디바이스사(Analog Device)에서 제작한 계측증폭기용 AD627 이다. Fig. 5 는 증폭기 (AD627)와 6 축 힘/모멘트센서의 브리지회로를 나타내고 있다. 사용된 증폭기는 일반 증폭기 3 개를

단일 칩으로 집적시켜 만든 것으로 하나의 외부 저항(R1)으로 증폭기의 이득(gain)을 6~1000 배로 조정할 수 있고, 이로 인해 회로가 간단해지고 온도에 대한 드리프트나 오프셋 전압으로 인한 영향을 줄일 수 있어 보다 정확한 증폭값을 얻을 수 있다. 증폭기 동작을 위한 전압은 핀 7 과 4 에 각각 +9 V 와 -9 V 를 인가해야 하고, 브리지회로(센서)의 출력전압은 핀 3 과 2 로 입력되며, 핀 1 과 8 에 연결된 200 Ω 의 저항을 이용하여 증폭률을 최대 1000 배까지 조정한다. 6 축 힘/모멘트센서에 입력한 전압은 +9 V 이고 가변저항을 이용하여 6 축 힘/모멘트센서의 무부하시의 초기출력을 0 으로 조정한다. 6 축 힘/모멘트센서의 각 센서들의 출력전압은 정격출력 0.5 mV/V 와 입력전압 9 V 를 고려하여 증폭기의 증폭률을 조정하여 각 센서의 최대출력이 약 5 V 정도가 되도록 하였다.

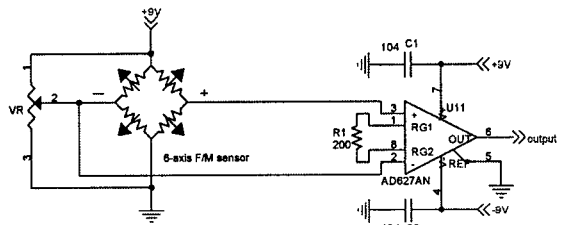


Fig. 5 Amplifier and bridge circuit of a 6-axis force/moment sensor

신호변환부는 A/D 컨버터와 D/A 컨버터로 구분되고, A/D 컨버터는 6 축 힘/모멘트센서 각 센서들의 출력인 아날로그신호를 DSP 에서 처리하기 위하여 디지털신호로 변환하며, D/A 컨버터는 모터를 전압으로 제어하기 위하여 디지털값을 아날로그신호로 변환하여 출력하는데 사용된다. Fig. 6 은 A/D 컨버터(AD976ACN)와 아날로그 멀티플렉서(ADG506AKN)을 나타내고 있다. 본 논문의 그리퍼는 2 개의 6 축 힘/모멘트센서로 구성되었으므로 총 12 개의 센서로부터 신호가 출력되므로 A/D 컨버터 12 개를 사용해야 한다. 이와 같은 방법은 비경제적이므로 16 채널을 사용할 수 있는 1 개의 아날로그 멀티플렉서(analog multiplexer)를 각 센서와 연결된 증폭기들과 연결하고, 이 아날로그 멀티플렉서와 1 개의 A/D 컨버터를 연결하였다. 아날로그 멀티플렉서의 채널은 EPLD 에서 데이터

D0, D1, D2, D3 을 D 플립플롭으로 래치(latch)한 MUX\_A0~A3 을 이용하여 선택되며, 핀 28 로 선택된 채널의 신호가 출력된다. 사용된 A/D 컨버터는 16 bit 의 병렬출력형, 채널 1 개, 분해능 0.3 mV, 4 us 의 빠른 데이터 변환속도, 16 비트 2 의 보수형태로 데이터 표현, 입력전압 범위 ±10 V 혹은 0~10 V, 전원전압 +5 V 인 특징을 가지고 있다.

A/D 변환은 핀 24~26 인  $\overline{R/\overline{C}}$  (read/convert start),  $\overline{CS}$  (chip select),  $\overline{BUSY}$  로 이루어지며, A/D 변환을 위해 변환시작 신호인  $\overline{R/\overline{C}}$  신호는  $\overline{CS}$  신호보다 최소 10 ns 먼저 LOW 로 내려가고 최소 50 ns 경과 후  $\overline{CS}$  신호보다 최소 10 ns 뒤에 HIGH 로 되어야 한다. 그러면 A/D 컨버터는 현재 데이터 변환 중이라는 것을 알리기 위해  $\overline{BUSY}$  신호를 A/D 변환이 완료될 때까지 최대 4 us 동안 LOW 로 유지하고, 변환이 완료되면  $\overline{BUSY}$  신호는 HIGH 가 되어 디지털 데이터를 출력하게 된다. 따라서 프로그램은 A/D 변환 개시 후에 최대 4 us 이내에 변환이 완료되므로 이 시간만큼 시간지연을 주고 나서 변환된 데이터를 읽거나  $\overline{BUSY}$  신호를 이용해서 이 신호의 상태를 조사(polling)하여 변환 데이터를 읽는다.

Fig. 7 은 D/A 컨버터(AD669AR)를 나타내고 있고, 이것은 16 비트의 병렬전압출력, 출력전압범위 10 V, 1 채널인 특징을 가지고 있으며, 아날로그디바이스사(Analog Device) 제품이다. D/A 컨버터의 병렬 데이터입력은 오프셋 바이너리(offset binary) 표현법이 사용되어 0000 0000 0000 0000B 일 때 -10 V, 1000 0000 0000 0000B 일 때 0 V, 1111 1111 1111 1111B 일 때 +10 V 가 출력된다.

통신 및 주변장치는 8255A PPI(programmable peripheral interface), 8251A PCI (programmable communication interface), MAX 232, LCD, 등으로 구성되었다. 8255A PPI 를 이용한 병렬입출력 인터페이스는 DSP 의 입출력(I/O)단자를 확장시키기 위하여 사용되며, 24 bit 의 I/O 핀(Port A, B, C)을 가지고 있다. 8251A PCI 와 MAX232 는 컴퓨터와 RS 232 방식의 직렬통신을 하기 위해 사용되며, 6 축 힘/모멘트 센서의 출력신호를 컴퓨터에 저장하기 위해 사용된다. MAX232 는 8251A 에서 출력된 TTL 레벨의 전압신호를 RS-232C 통신규격에 맞도록 약 5~15 V(전형적으로 8 V)의 전압으로 변환시켜 주는 소자이며, 이것은 +5 V 의 단일 전원으로 그것이 내부에 가지고 있는 전압변환회로를 이용하여 수

행한다.

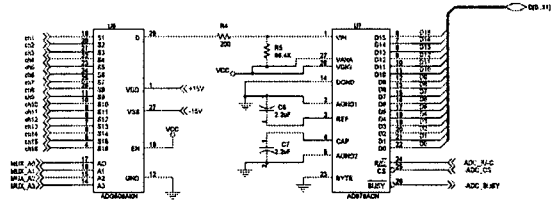


Fig. 6 Circuit of A/D converter(AD976 and ADG506)

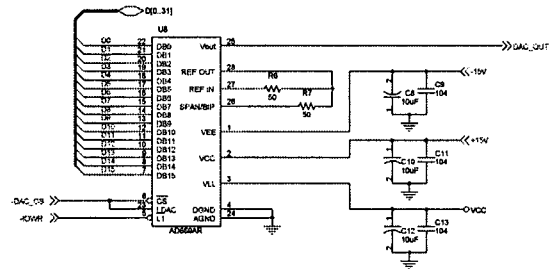


Fig. 7 Circuit of D/A converter(AD669AR)

어드레스 디코더는 DSP 의 처리속도를 향상시키기 위하여 빠른 동작속도를 가지는 알테라사(Altera)의 EPLD(erasable/programmable logic device : EPM7064SLC68-10)를 사용하였으며, 이것은 사용자가 임의의 논리회로를 프로그램하여 내장시킬 수 있는 소자로서 회로의 수정이 매우 용이한 장점이 있다. Fig. 8 는 EPLD 에 저장된 논리회로도 를 나타내고 있다.

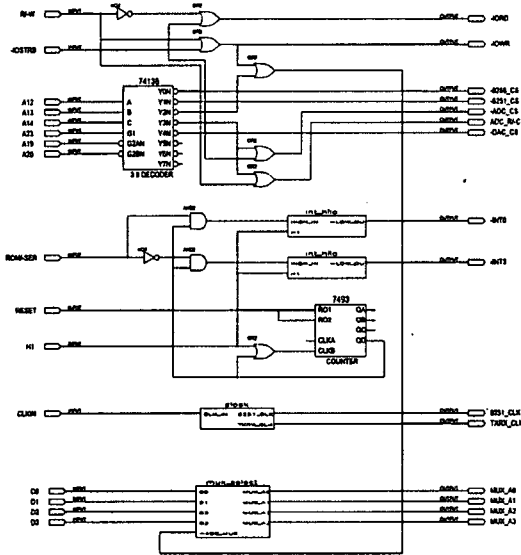
EPLD 의 논리회로에서, 입력은 DSP 와 연결되는 R/-W, -I/OSTROB, A12, A13, A14, A23, A19, A20, RESET, H1, CLKIN, D0, D1, D2, D3, 50 MHz 를 발생하는 오실레이터로부터 출력되는 CLKIN 과 컴퓨터의 프린터포트와 연결되는 ROM/-SER 이고, 출력은 -I/ORD, -I/OWR, -8255\_CS, 8251\_CS, ADC\_CS, ADC\_R/-C, DAC\_CS, -INT0, INT3, 8251\_CLK, TXRX\_CLK, MUX\_A0, MUX\_A1, MUX\_A2, MUX\_A3 이다. EPLD 출력중 -I/ORD 와 -I/OWR 는 DSP 가 읽고 쓸 때 사용하는 신호 R/-W, 입력과 출력스트로브 신호 -I/OSTROB 를 NOT 게이트와 OR 게이트를 조합하여 만들어지며, 8255A PPI 와 8251A PCI 의 칩으로부터 데이터를 읽고 쓸 때 사용된다. -8255\_CS, 8251\_CS, ADC\_CS, ADC\_R/-C, DAC\_CS 들은 R/-W, -I/OSTROB, A12, A13, A14, A23, A19, A20, 디코더(74138), OR 게이트 등을 조합하

여 만들어지며, 8255A PPI, 8251A PCI, AD976ACN, AD669AR 의 칩을 선택하기 위하여 사용된다. - INT0 와 INT3 는 ROM/SER, RESET, H1, CLKIN 과 EPLD 로직회로인 NOT 게이트, OR 게이트, AND 게이트, 카운터(7493), 디플립플롭으로 구성된 INT\_HILO 등을 조합하여 만들어지며, 제어장치를 부팅할 때 사용된다.

EPROM 을 사용하여 제어장치를 부팅할 경우에는 ROM/SER=1(프린터포트를 연결하지 않음)이 되어 INT0 가 동작되고 PC 로부터 프린터포트를 통하여 프로그램을 다운로드하여 부팅할 경우에는 ROM/SER=0(프린터포트 연결됨)이 되어 INT3 가 동작된다. 8251\_CLK 와 TXRX\_CLK 은 디플립플롭으로 구성된 CLOCK 과 CLKIN 으로 만들어지며, 8251\_CLK 은 8251A 에 입력될 2.5 MHz 의 클럭을 발생시키고, TXRX\_CLK 은 8251A 의 송수신을 위해 156.25 kHz 의 클럭을 발생시킨다. 그리고 MUX\_A0, MUX\_A1, MUX\_A2, MUX\_A3 은 D0, D1, D2, D3, 디플립플롭으로 구성된 MUX\_SELECT 를 조합하여 만들어지며, 멀티플렉서인 ADG506AKN 의 16 채널을 선택하기 위하여 사용된다. Table 1 은 메모리와 입출력소자의 어드레스를 나타낸 것이다.

Table 1 Memory and I/O address map

Address range	IC name
000000H-00FFFFH	EPROM(M27C512)
900000H-907FFFH	SRAM(UM61256)
810000H-810003H	8255A PPI
811000H-811001H	8251A PCI
812000H	ADG506
813000H	AD976
814000H	AD669



위한 펄스를 모터 드라이브에 입력시키고 안전하면 PI 제어기에 순지시값을 보낸다. PI 제어기는 모터에 입력시킬 펄스수를 계산하여 그것을 모터 드라이브로 출력하며, 연속적인 제어를 위해 흐름도에서 나타낸 것과 같이 센서의 측정 전으로 돌아간다.

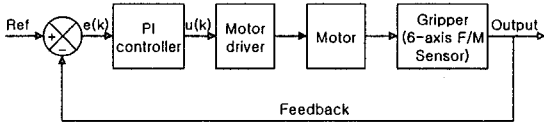


Fig. 10 Closed loop system of robot's gripper controller

### 3. 실험 및 고찰

Fig. 10 은 로봇의 그립퍼 제어장치의 폐루프계를 나타내고 있다. 폐루프 제어계는 앞에서 설명한 것과 같이 PI(proportional-integral) 제어기에서 기준값을 기준으로 오차를 계산하고 그 결과를 이용하여 모터 드라이브의 입력값을 결정하여 출력하며, 그 값을 이용하여 모터 드라이브는 모터를 회전시켜 이동용 그립퍼 2 를 좌우로 이동시킨다. 그에 따라 그립퍼들은 미지물체를 잡게 되고 미지물체가 그립퍼들에 접촉되면, 6 축 힘/모멘트센서는 접촉력에 상응하는 출력전압을 발생한다. PI 힘제어를 위한 일반적인 식은 다음과 같다.

$$u(k) = K_p e(k) + K_i \sum_{n=1}^k e(n) \quad (1)$$

여기서,  $u(k)$ 는  $k$  번째 PI 제어기의 출력값,  $K_p$ 는 비례게인,  $K_i$ 는 적분게인,  $e(k)$ 는 기준값에서 그립퍼 제어장치의 출력값(6 축 힘/모멘트센서의 출력값)을 뺀 값,  $\sum_{n=1}^k e(n)$ 은 오차의 합을 의미한다.

그립퍼 제어장치는 서보모터의 전달함수를 알 수 없으므로 시스템의 수학적 해석 및 시뮬레이션에 의한 PI 계수 결정을 할 수 없다. 그래서 본 논문에서는 PI 제어기의 비례게인  $K_p$ , 적분게인  $K_i$ 를 구하기 위한 특성시험을 실시하였다. 특성시험을 위해  $K_p$ 는 40에서 90까지 10단위로 6개를 선정하였으며,  $K_i$ 는 0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.5 등 총 5개를 선정하였다. Table 2는 특성시험 결과인 상승시간(s), 정상상태편차(V), 정상상태오차(V)를 나타낸 것이다.

Table 2 Rising time, steady state deviation and steady state error from the characteristic test

$K_p$	$K_i$	Rising time(s)	Steady state deviation (mV)	Steady state Error (mV)
40	0.05	0.78	0.018	$\pm 0.013$
	0.1	0.72	0.010	$\pm 0.013$
	0.2	0.72	0.006	$\pm 0.009$
	0.3	0.66	0.005	$\pm 0.010$
	0.5	0.41	0.017	$\pm 0.013$
50	0.05	0.54	0.013	$\pm 0.015$
	0.1	0.54	0.008	$\pm 0.014$
	0.2	0.54	0.007	$\pm 0.011$
	0.3	0.54	0.006	$\pm 0.012$
	0.5	0.54	0.007	$\pm 0.010$
60	0.05	0.42	0.011	$\pm 0.010$
	0.1	0.42	0.009	$\pm 0.011$
	0.2	0.42	0.005	$\pm 0.013$
	0.3	0.42	0.004	$\pm 0.010$
	0.5	0.42	0.005	$\pm 0.014$
70	0.05	0.42	0.007	$\pm 0.010$
	0.1	0.42	0.006	$\pm 0.013$
	0.2	0.42	0.005	$\pm 0.010$
	0.3	0.42	0.003	$\pm 0.012$
	0.5	0.42	0.003	$\pm 0.012$
80	0.05	0.3	0.008	$\pm 0.010$
	0.1	0.3	0.006	$\pm 0.013$
	0.2	0.3	0.005	$\pm 0.007$
	0.3	0.3	0.003	$\pm 0.007$
	0.5	0.3	0.007	$\pm 0.012$
90	0.05	0.3	0.009	$\pm 0.015$
	0.1	0.3	0.008	$\pm 0.016$
	0.2	0.3	0.006	$\pm 0.014$
	0.3	0.3	0.006	$\pm 0.013$
	0.5	0.3	0.007	$\pm 0.012$

상승시간은  $K_p$ 가 40 이고  $K_i$ 가 0.05에서 0.5까지 증가할수록 0.78 s에서 0.41 s까지 감소하는 경향이 있으며,  $K_p$ 가 50, 60, 70, 80, 90 일 때에는  $K_i$ 와 무관하게 각각 0.54 s, 0.42 s, 0.42 s, 0.30 s, 0.30 s이다. 정상상태편차는  $K_p$ 가 40~60 일 경우에는  $K_i$  값에 따라 0.018 V~0.004 V 이고, 특히  $K_i$ 가

0.2, 0.3 일 때 0.004 V~0.007 V로 매우 적다. 그리고  $K_p$  가 70~90 일 경우에는  $K_i$  값에 따라 0.009 V~0.003 V 이고, 특히  $K_i$  가 0.2, 0.3 일 때 0.003 V~0.006 V 로 매우 적다. 정상상태오차는 시험한  $K_p$  와  $K_i$  의 전구간에서  $\pm 0.015$  V~0.007 V 이고, 가장 적은 오차는  $K_p$  가 80 이고  $K_i$  가 0.2 와 0.3 일 때  $\pm 0.007$  V 이다. 정상상태편차와 오차가 큰 것은 모터와 모터 드라이브로부터 발생하는 노이즈가 그리퍼 제어장치와 6 축 힘/모멘트센서 사이에 흐르는 미약 전류에 영향을 미쳤기 때문이다.

위의 결과들을 분석한 결과, 상승시간은  $K_p$  가 클수록 작아지는 경향을 보였고, 정상상태편차도  $K_p$  가 클수록 작아지는 경향을 보였으나  $K_p$  가 70~90 에서는 비슷한 값을 보였으며, 정상상태오차는 대략  $\pm 0.012$  V 이었고,  $K_p$  가 80,  $K_i$  가 0.2 와 0.3 일 때  $\pm 0.007$  V 로 매우 적었다. 따라서 본 논문에서 설계 및 제작한 그리퍼 제어장치의 PI 힘제어 계인  $K_p$  와  $K_i$  는 각각 80 과 0.3 으로 결정하였으며, 이때 상승시간은 0.30 s, 정상상태편차는 0.003 V, 정상상태오차는  $\pm 0.007$  V 이다. Fig. 10 은 최종적으로 결정한  $K_p=80, K_i=0.3$  일 때의 그리퍼 제어기의 응답특성을 나타내고 있다.

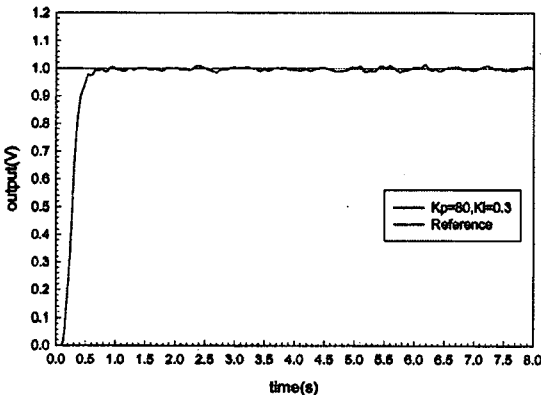


Fig. 11 Response of the robot's gripper system( $K_p=80, K_i=0.3$ )

#### 4. 결론

본 논문에서는 DSP 를 이용한 로봇의 그리퍼 제어장치를 설계 및 제작하였으며, 그리퍼는 미지 물체를 안전하게 잡을 수 있도록 2 개의 6 축 힘/모멘트 센서를 이용하여 구성하였다. 그리고 그리퍼

제어장치를 PI 힘제어하기 위하여 비례계인과 적분계인을 결정하기 위한 응답특성시험을 실시하였다. 시험결과 비례계인  $K_p$  는 80, 적분계인  $K_i$  는 0.3 으로 결정되었고, 그들을 이용하여 PI 제어를 실시한 결과 미지물체를 안전하게 잡을 수 있음을 확인할 수 있었다. 그리고 이동용 그리퍼 는 미지 물체를 파괴시키거나 떨어뜨리지 않고 안전하게 잡을 수 있을 뿐만 아니라 그리퍼의 어느 위치에 물체가 위치해 있는지를 파악할 수 있다.

따라서 본 논문에서 개발한 제어장치와 본 연구와 연관된 기계발한 그리퍼는 폭발물과 같은 위험물 처리를 위한 지능형 그리퍼와 미지물체를 안전하게 잡기 위한 산업용 그리퍼로 사용 될 수 있을 것으로 생각된다.

#### 참고문헌

1. Ceccarelli, M., "Grasp Forces in Two-finger: Modeling and Measuring," Proceedings of 5th International Workshop on Robotics in Alpe Adria-Danube Region, pp. 321-326, 1996.
2. Castro, D., "Tactile Force Control Feedback in Parallel Jaw Gripper," Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Vol. 3, No. 3, pp. 884-888, 1997.
3. Nkgatho, S. T., "Intelligent Gripper using Low Cost Industrial," Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Vol. 2, No. 2, pp. 415-419, 1998.
4. Carlos, M. V., "BRF Competitive Hopfield Neural Networks for Objects Grasping," Proceedings of the Fourth International Conference on Motion and Vibration Control, Vol. 3, No. 3, pp. 1171-1176, 1998
5. Kim, G. S., "Development of a 6-axis robot's finger force/moment sensor for stably grasping an unknown object," KSPE, Vol. 20, No. 7, pp. 105-113, 2003.