

직립보행로봇 Actuator 개발에 관한 연구

(A study on Development of Actuator for Biped Walking Robot)

문진수* · 김철우

(Jin-Soo Moon · Cheul-U Kim)

요 약

직립보행로봇은 동적인 시스템 구현을 위해 에너지원과 제어장치부가 로봇에 탑재되어야 한다. 때문에 본 연구에서는 소형에서 높은 기동 토크를 얻을 수 있는 직류전동기를 선택하였다. 직류전동기 서보시스템에는 아날로그 처리방식의 파워앰프를 이용하여, 제어기와 구동기가 일체화된 하나의 모듈로 개발하였다. 이를 로봇액추에이터에 적용하고 동작과 복귀시의 응답특성을 연구하였다. 주 제어부는 PIC(Micro controller)를 채용하여 서보시스템과 함께 소형경량으로 로봇에 탑재할 수 있다.

Abstract

Biped robot requires that an energy source and a control part should be installed on the body to realize active system. So, we choose the DC motor having high torque in compact size in this study. In the DC motor serve system, we choose power amplifier with analog configuration, developed the module combined the controller and the driver. We applied this module to robot actuator and studied the response characteristics in an action and a return. Main controller with serve system, loading PIC micro controller, can be load on the robot with light weight.

Key Words : Biped robot, Actuator, DC servo motor, PID, DC servo amp

1. 서 론

로봇기술은 메카트로닉스에 컴퓨터를 결합한 응용과학의 일부로서, 공학의 다양한 분야를 포괄하는 기술이다. 이 기술은 초기 1801년 Joseph Jacquard 가 프로그램방식의 직물기계를 개발하여 대량생산

에 사용한 후 산업용, 군사용, 의료용, 가정용에 이르기까지 다양한 분야에 적용되고 있다.

산업현장에서도 종래의 소품종 다량생산 체제로부터 다품종 소량생산 체제로 전환되고 있다. 이에 대응하여 공정의 유연성을 확보할 수 있는 FMS (flexible manufacturing system, 이하 FMS라 함)가 적용되고 있는데, FMS는 로봇을 주축으로 운용되며 로봇의 활용도가 생산능력에 직결된다고 할 수 있다. 때문에 산·학·연 교육현장에서도 종전의 단순기술에서 복합기술 과정으로 전환되고 있

* 주저자 : 부산대학교 전기공학과 박사과정
Tel : 051-610-3150, Fax : 051-610-3155
E-mail : jsm@korcham.net
접수일자 : 2005년 7월 12일
1차심사 : 2005년 7월 14일
심사완료 : 2005년 8월 2일

으며, 로봇운용관련 첨단기술 교육의 필요성이 부각되고 있다[1,2,3].

로봇은 크게 고정식과 이동식으로 분류되며, 이동식로봇은 다시 바퀴로봇과 직립보행로봇으로 구분할 수 있다. 바퀴로봇은 동작이 안정되고 중량물을 탑재할 수 있어 설계나 제어가 비교적 간편하다. 그리하여 많은 연구가 있었지만, 현재는 이동지형의 제한을 받지 않은 직립보행로봇을 대상으로 지능화 그리고 인간친화형로봇에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다[4].

직립보행로봇은 동적인 시스템구현이 되어야 하고, 모든 제어장치부가 로봇에 쉽게 탑재되어야 한다. 따라서 신뢰성이 우수하고 소형경량이면서도 큰 출력을 발생시킬 수 있는 직류전동기가 주로 채용되고 있다. 이는 높은 기동 토크(starting torque)를 얻을 수 있으며, 단자전압과 전동기의 속도가 일차 비례하고, 전류 및 토크가 역시 일차 비례하는 선형제어 특성을 얻을 수 있기 때문이다. 또한 속도제어 범위가 넓다는 장점 때문에 산업용 로봇, 자동화시스템, 공작기계 등의 정밀성이 요구되는 구동원으로 널리 사용되고 있다[5,6].

직류전동기제어에 사용되는 전력소자는 SCR을 많이 적용하고 있으나, turn-off기능이 없어 장치가 커지고 고속응답의 한계점이 있다. 그러나 최근에는 게이트 신호만으로 on, off시킬 수 있는, GTO를 이용한 초퍼구동방식이 활발히 추진되고 있다[7,8]. 하지만 직립보행로봇에 전통적인 직류전동기 구동방식으로 접근했을 때에는 전원공급의 문제점, 스위칭 소자의 전력손실, 제어장치의 중량과 크기, 경제성 등의 문제로 부적합한 점이 많았다.

본 연구에서는 이러한 한계점 때문에 서보시스템에 아날로그 처리방식의 파워앰프(Power OP amp, LM12, 이하 파워앰프라 함)를 이용하여, 제어기와 구동기가 일체화된 하나의 모듈로 구성하였다. 이를 대상으로 위치 응답특성을 실험하고, 직립보행로봇에 적용하여, 음성과 비전(vision)인식이 가능한 Intel_Gent란 이름으로 17축 직립보행로봇을 개발하였다.

2. 본 문

2.1 직류전동기 위치서보시스템

직류전동기 위치서보시스템의 블록선도는 그림 1과 같으며, 회전각 입력지령 θ_i 에 대한 모터의 각 변위 θ_o 는 모터로 위치제어를 할 때 필요한 전달함수의 하나이다[9,10].

그림 1(a)는 각도입력에 대해 모터의 출력샤프트 각도를 추종시키는 위치서보기구이고, 그림 1(b)는 블록도이다. 계의 초기조건을 0으로 가정하면 각 블록의 전달함수는 다음과 같이 유도된다.

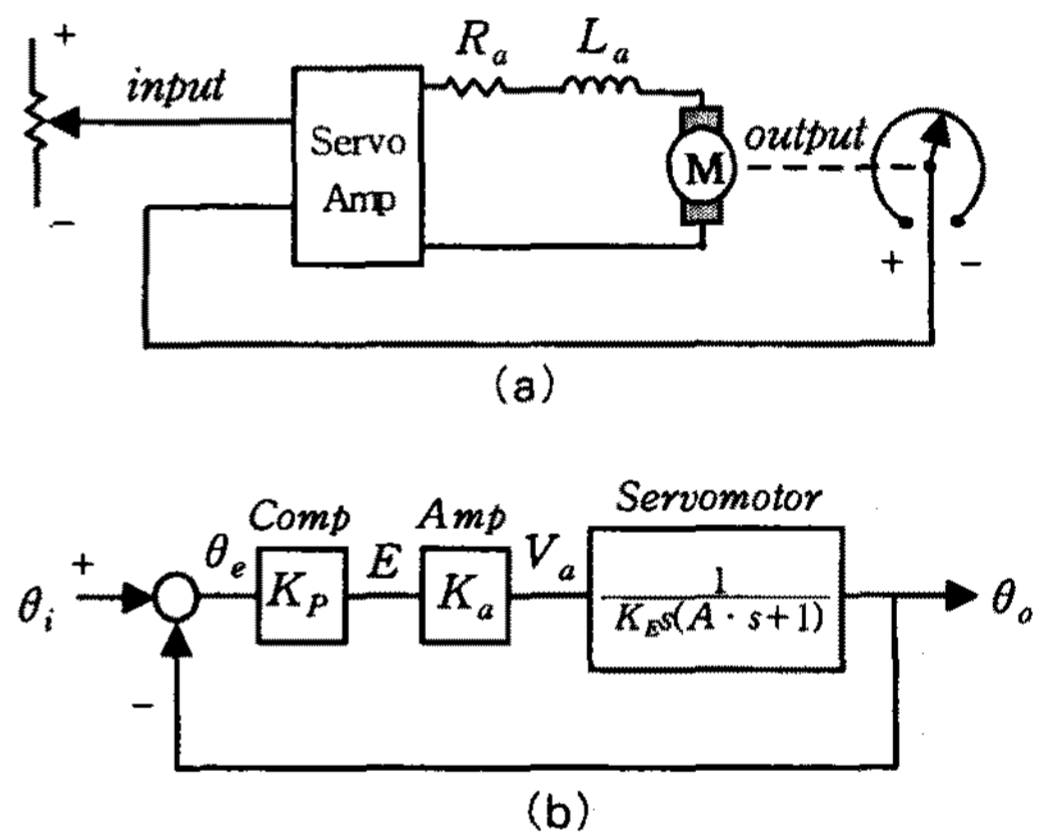


그림 1. 직류전동기 위치서보시스템과 블록도
Fig. 1. Block diagram of DC motor position control system

Comp의 전달함수 K_p 는 식 (1)이 되고,

$$K_p = \frac{E(s)}{\theta_i(s) - \theta_o(s)} = \frac{E(s)}{\theta_e(s)} \quad (1)$$

Amp의 전달함수 K_a 는 식 (2)가 된다.

$$K_a = \frac{E(s)}{V_a(s)} \quad (2)$$

Servomotor의 전달함수는 식 (3)이 되어,

$$\frac{\theta_o(s)}{V_a(s)} = \frac{1}{K_{ES}(A \cdot s + 1)} \quad (3)$$

폐 루프전달함수는 식 (4)가 된다.

$$\frac{\Theta_o(s)}{\Theta_i(s)} = \frac{\frac{K_p K_a}{K_E A}}{s^2 + \frac{1}{A} s + \frac{K_p K_a}{K_E A}} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (4)$$

여기서

θ_i : 회전각 입력지령 θ_o : 모터 각 변위

θ_e : Comp 입력 E : Comp 출력

V_a : 서보앰프 출력을 의미한다.

식 (4)에서 고유주파수 ω_n 과 감쇠비 ζ 는 식 (5)와 같다.

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K_p K_a}{K_E A}}, \quad \zeta = \frac{1}{2\sqrt{\frac{K_p K_a}{K_E A} \cdot A}} \quad (5)$$

2차지연계 전달함수인 식 (5)에 스텝상의 각도입력을 가하면, 식 (6)이 된다.

$$f(t) = \frac{\omega_n^2}{s(s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2)} \quad (6)$$

식 (6)에서 부하를 포함한 서보계의 스텝응답, 진동주기 등의 특성을 평가할 수 있다.

2.2 로봇 시스템의 구성

본 연구에서 개발된 직립보행로봇은 인간친화형으로 지능을 가지고 있으며, 사람의 형태와 같이 두 발로 보행이 가능하다. 그리고 인간이나 동물에게만 적용되는 조건 학습도 할 수 있다. 즉 행동반복에 의한 습득으로 자극에 의해 반응하는 단순학습을 사람처럼 재연할 수 있다.

머리 부분에는 디지털 카메라를 내장하고 있어 화상인식 결과를 행동이나 음성으로 출력할 수 있다. 그리고 음성검출 센서가 머리 좌우측 귀의 위치에서 음성신호를 받는다. 뿐만 아니라 음성인식 결과를 행동이나 음성으로 답변할 수 있어 대화 하면서 의

사전달이 가능하다. 음악을 듣고 리듬에 맞추어 춤을 추는 즐거움도 표현할 수 있어 감성을 겸비한 로봇이라 할 수 있다.

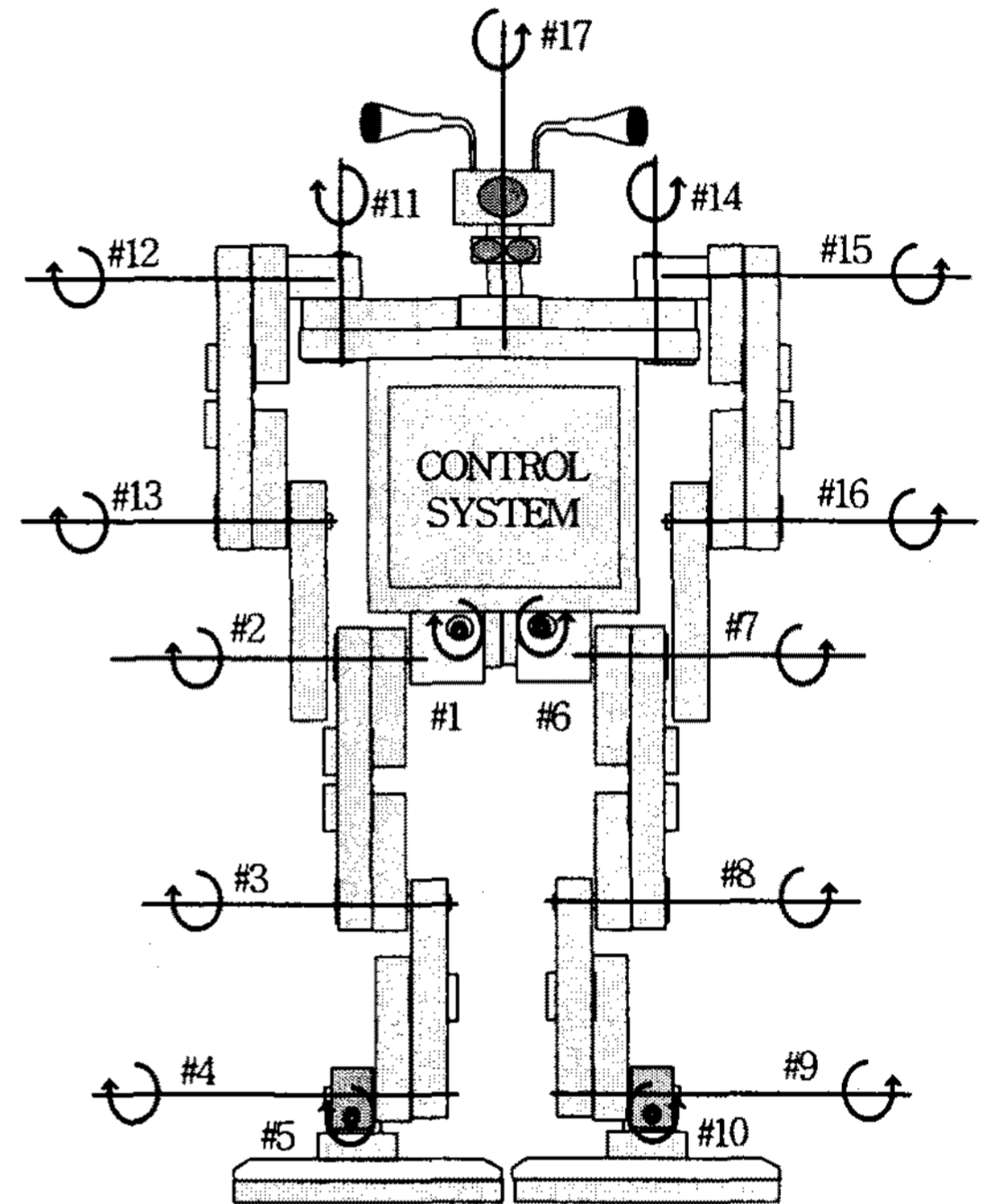


그림 2. 로봇시스템 구성도
Fig. 2. Robot system configuration

본 로봇은 Intelligent와 Gentleman의 어원을 합성하여 Intel_Gent라 명명하였다(이하 Intel_Gent라 함). Intel_Gent는 그림 2와 같이 17개의 액추에이터를 구성하여 보다 유연한 동작이 구현된다. 서보전동기는 DC모터를 채용하여 고출력의 서보시스템으로 개발하였다.

주 제어부는 로봇 전체의 동작을 제어하는 장치로서, 그림 3과 같이 입·출력부로 구분된다. 입력부에는 음성 인식부, 음성 합성부, 화상 인식부 외 각종 센서로 구성되어 있으며, 출력부에는 스피크를 통한 음성출력과 17개의 액추에이터 서보제어 장치로 구성되어있다. MPU(Microprocessor Unit, 이하 MPU라 함)는 콤팩트한 구조를 위하여 원칩(PIC16F877) 2개를 동시제어 시스템으로 구성하였다.

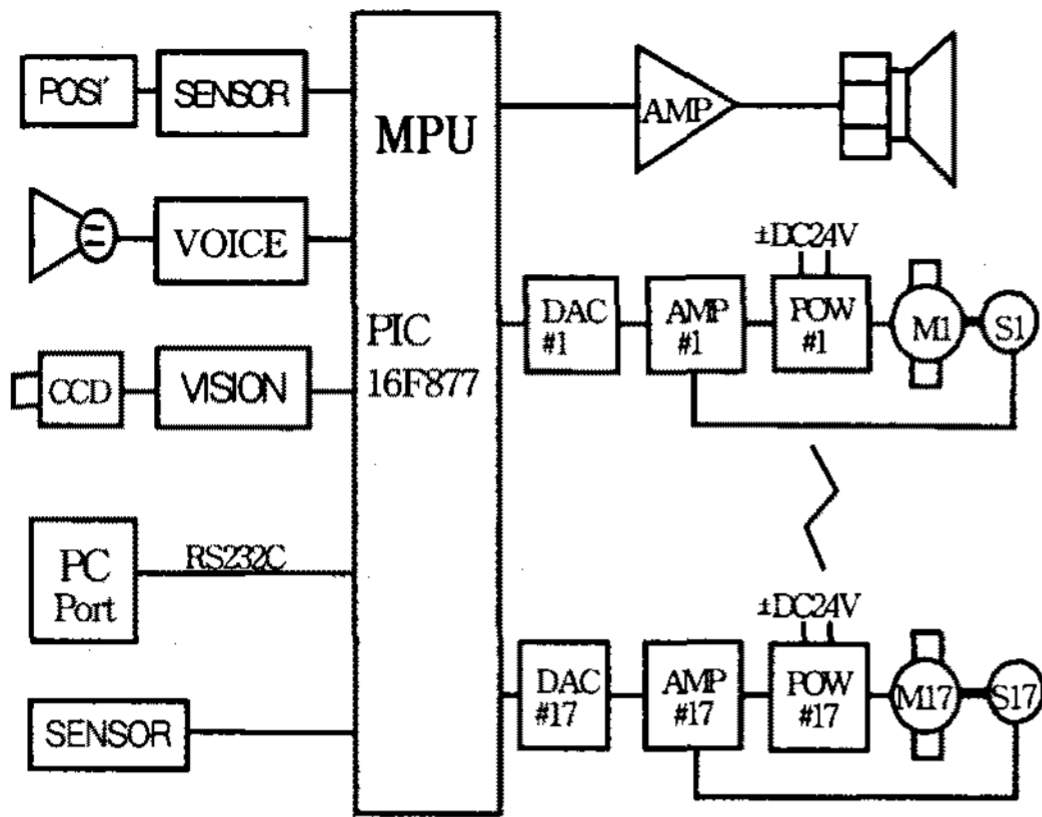


그림 3. 주 제어부 구성도
Fig. 3. Configuration of main control system

여기서 음성 인식부(VOICE)는 YN-100전용 모듈로 AT29 C010A프레쉬 메모리칩으로 구성되어 있으며, 음성인식결과를 BCD코드로 MPU에 출력한다. 음성합성은 ISD253단일 칩으로 구동되며, MPU의 BCD코드 명령에 따라 선택된 음성을 재생한다. 화상인식부(VISION)는 CCD카메라(SFA-410ED)와 BlueEye보드(BE010511-8)로 구성되어 있으며, 검출된 화상을 비교 판단하여 결과를 출력한다.

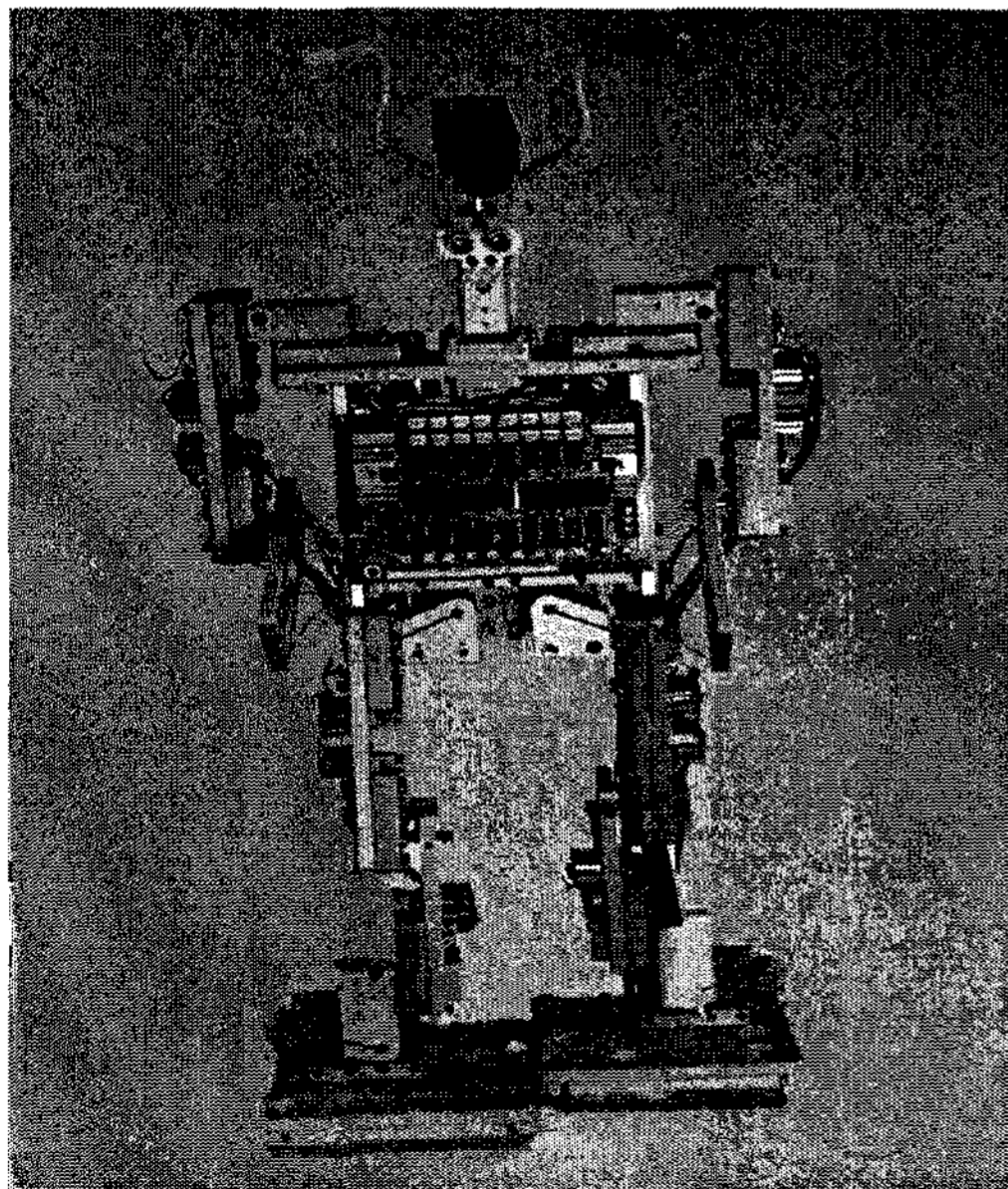


그림 4. Intel_Gent 로봇
Fig. 4. Overall view of Robot

본 로봇의 Software구성은 17개의 액추에이터 동작에 관련된 데이터를 제어하는 방식이며, 본 연구에서 개발한 로봇의 실물은 그림 4와 같다.

동작순서는 먼저 마이크로프로세서를 초기화시키고 로봇전체의 I/O조건을 검색하여, 만족 시에 각 축의 원점 동작을 수행하게 된다. 이후 음성인식시스템의 12개의 명령에 따라 관련동작을 수행하는데, 각각의 동작은 리듬에 맞추어 연속데이터를 직렬 전송하게 된다.

3. 실험 및 결과

본 연구에서 개발한 Intel_Gent 로봇으로 그림 2의 액추에이터 #12를 실험대상으로 선정하였다. 실험(그림 8~10)에서는 제어 파라미터 K_p , K_i 값을 변경하면서 액추에이터를 구동하는 방식으로, 동작과 복귀 시의 위치응답 특성실험이다.

3.1 로봇액추에이터 구동장치 구성

로봇액추에이터는 영구자석형 직류전동기를 적용하였으며, 전동기축과 로봇조인트 사이에 기어박스를 통하여 로봇 동력을 전달한다. 로봇액추에이터에 사용된 직류전동기의 파라미터(Parameter)는 표 1과 같다. 직류전동기 구동방식에 아직까지 널리 활용되지 않았던 파워앰프를 이용한 서보시스템을 구축하고, 서보시스템의 구동 및 제어 방식에서는 아날로그 처리기법을 적용하였다.

표 1. DC 모터의 파라미터
Table 1. Parameters of DC motor

기호	설 명	값	단 위
R_m	전기자 저항	8.57	[Ω]
L_m	전기자인덕턴스	0.16	[mH]
J_m	전기자회전관성	2.84×10^{-7}	[$kg \cdot m^2$]
K_m	역기전력 상수	0.0061	[V/rad/sec]
K_t	토크 상수	0.0061	[N·m/A]
K_g	기어비	150:1	

로봇자세에 관련된 디지털데이터를 MPU에서 발송하고, D/A 변환기에서는 아날로그 전압으로 변환하여 출력한다. 이 전압은 각각의 액추에이터의 변위 값 기준(reference value)으로 전력변환회로에 공급된다.

즉 로봇액추에이터인 직류전동기를 구동하기 위한 전력변환 회로에서, 전동기의 방향과 위치를 제어할 수 있는 폐 루프제어(feedback control system) 방식을 채용함으로써, 외란에 의한 변형 없이 일정 자세를 유지할 수 있게 된다.

3.1.1 액추에이터 구동부

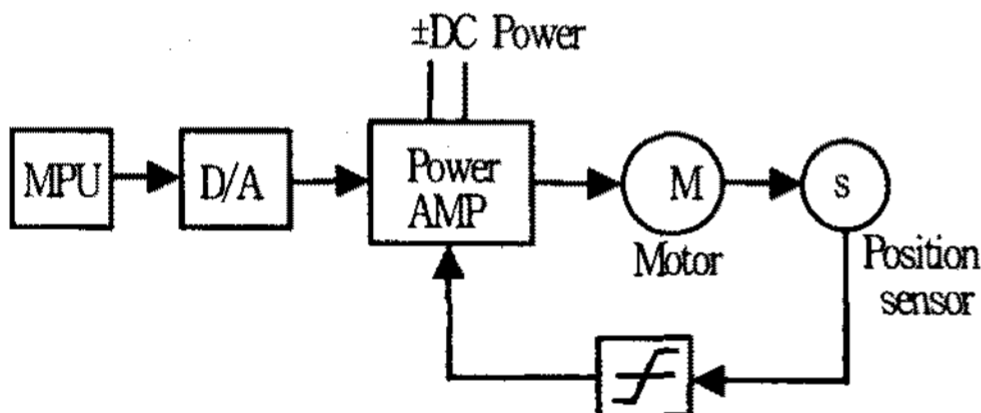


그림 5. DC서보시스템 블록선도
Fig. 5. Block diagram of DC servo system

그림 5는 직류전동기를 구동하기 위한 서보시스템 블록선도이다. MPU에서 결정된 디지털데이터를 D/A변환부에서 아날로그 전압으로 출력한다. Power amp는 비례 증폭된 전력을 제어함으로써, 전동기의 회전방향 및 위치를 제어할 수 있다.

전력제어 소자로는 파워앰프(LM12)를 이용한 아날로그 방식을 채용하였다. 파워앰프는 연산증폭기로 많이 사용되고 있는 OP amp($\mu A741$)와 유사한 특성을 가지면서, $\pm 30[V]$ 전원전압에서 $10[A]$ 의 출력제어가 가능한 전력증폭기이다. 모노타입으로 $4[\Omega]$ 의 부하에 $80[W]$ 의 정현파 전력을 보낼 수 있다. 또 전원단락 및 과부하 그리고 케이스온도가 $150[^\circ C]$ 를 초과 시에는 출력이 차단되는 보호기능을 가지고 있다.

3.1.2 제어시스템의 구성도

본 연구에서는 로봇 관절부 변위제어를 목적으로 하기 때문에 위치제어서보시스템을 구성하였다. 그

림 6은 본 연구에서 개발한 로봇의 자세를 제어하기 위한 액추에이터의 서보시스템구성도이다.

D/A Converter(Digital-To-Analog Converter, 이하 D/A Converter라 함)는 그림 6(a)와 같이 디지털수치를 아날로그 전압으로 변환하는 장치이다. DAC8043칩은 아날로그디바이스사의 12[bit] D/A Converter로 시리얼 통신에 의해 구동된다.

MPU에서 결정된 데이터가 전송되면 DAC8043에서는 D/A변환된 전류 값이 출력된다. 이 출력을 OP amp와 함께 구성하면, 출력은 다양한 전압변화폭을 얻을 수 있다.

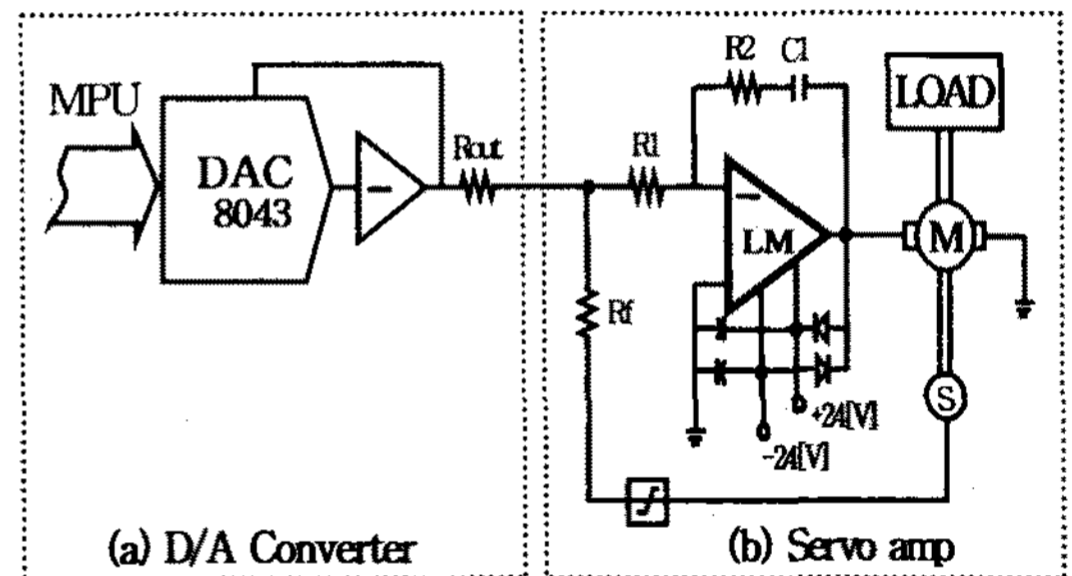


그림 6. DC서보시스템 회로도
Fig. 6. Schematic diagram of DC servo system

서보제어부에서는 그림 6 (b)와 같이 D/A변환부에서 발생된 전압을 기준으로 파워앰프(LM12)를 이용하여 전력을 제어한다. 전압의 범위는 $0\sim 12[V]$ 로 변위 $0\sim 360[^\circ]$ 까지 제어가 가능하지만, 여기서는 $20\sim 340[^\circ]$ 까지 $320[^\circ]$ 범위를 제어한다.

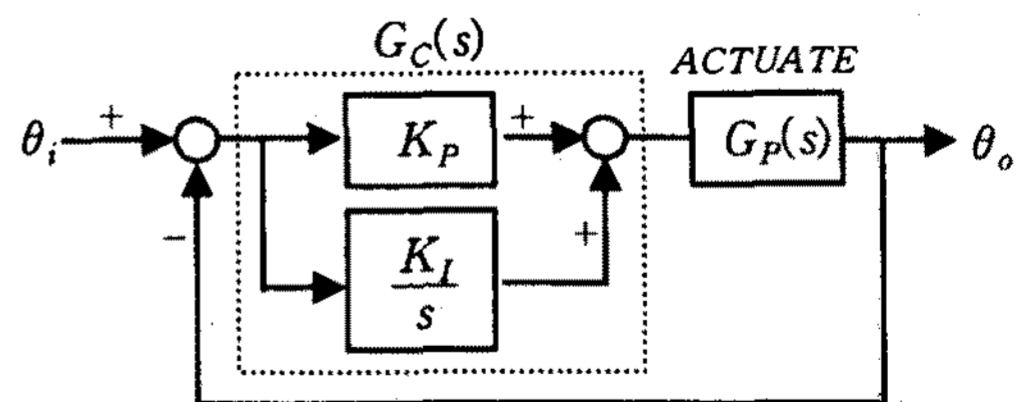


그림 7. PI 제어시스템의 블록선도
Fig. 7. Block diagram of PI control system

변위센서는 포텐셜미터를 액추에이터와 직결하였으므로 각도변위와 비례된 전압을 검출한다. 이 검출전압과 기준전압을 비교한 전압차를 반전 증폭하여 모터에 공급한다. 이때의 전력증폭도는 그림 6(b)

의 $-R2/R1$ 결과 값으로 Kp 값을 선정한다. 운전 중에 발생하는 액추에이터의 자중에 의한 하강정도나 외란에 의한 변화량은 폐 루프 제어 방식으로 보상하여 일정 자세를 유지하게 된다.

또한 정상상태의 오차를 줄이기 위해 PI제어기를 사용하는데, 그림 7은 연속치계 블록선도이고 전체 시스템의 전달함수는 다음과 같다.

$$\frac{\theta_o}{\theta_i} = \frac{G_c(s) \cdot G_p(s)}{1 + G_c(s) \cdot G_p(s)} \quad (7)$$

여기서 PI제어기의 전달함수는 다음 식으로 표현된다.

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (8)$$

식 (8)에서 적분항은 정상상태 오차를 개선하는데 영향을 미친다. 오차신호 $e(t)$ 에 의해 동작하는 연속치계 PI제어기의 방정식은 다음과 같다.

$$u(t) = K[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt] \quad (9)$$

여기서 $u(t)$: 제어기출력
 K : 이득상수
 T_i : 적분시간 이다.

3.2 결과 및 고찰

Intel_Gent 로봇을 그림 4와 같이 개발하고, 전동기 제어시스템을 그림 6과 같이 구성하였다. 본 논문의 실험대상은 그림 2의 액추에이터 #12축을 선정하였다.

실험조건은 위치데이터를 $P=4[V](120[^\circ])$, 적분제어 값($K_i=0$), 그리고 샘플링시간을 $2500[ms]$ 로 고정하고, K_p 값의 변화에 따른 위치응답 특성실험이다. 그림 8의 AV(Actual value)와 DV(Differential value)를 대상으로 ($K_p=30$)에서 실험한 결과 응답시간이 늦고, DV가 "0"으로 도달하지 못하였다.

비례제어 값($K_p=120$)에서는 진동으로 불안정하며, 그림 9($K_p=90$)의 특성이 비교적 안정된 상태이다.

이상의 실험에서 K_p 값을 감소시키면 편차가 커지고, 증가할수록 불안정한 진동이 발생하였다. K_i 값은 그림 10에서와 같이 응답특성 향상에 영향을 주지 못하므로 그림 9($K_p=90, k_i=0$)를 #12축의 최적조건으로 결정하였다.

그림 9는 실험에서 결정된 최적조건이고, 그림 11에서는 Motor power와 위치응답 특성곡선이다. 이 특성에서는 하강시간($400[ms]$)과 복귀시간($600[ms]$)의 시간차가 있었다.

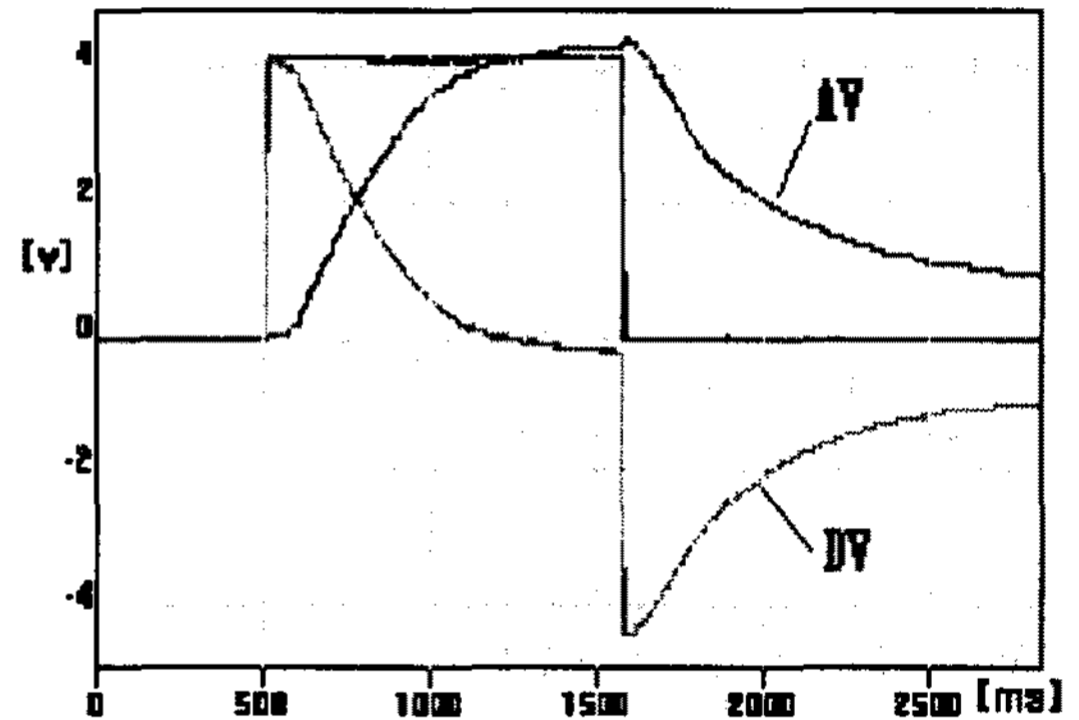


그림 8. 위치응답 특성도($K_p=30$)
 Fig. 8. Position response characteristics to gain change ($K_p=30$)

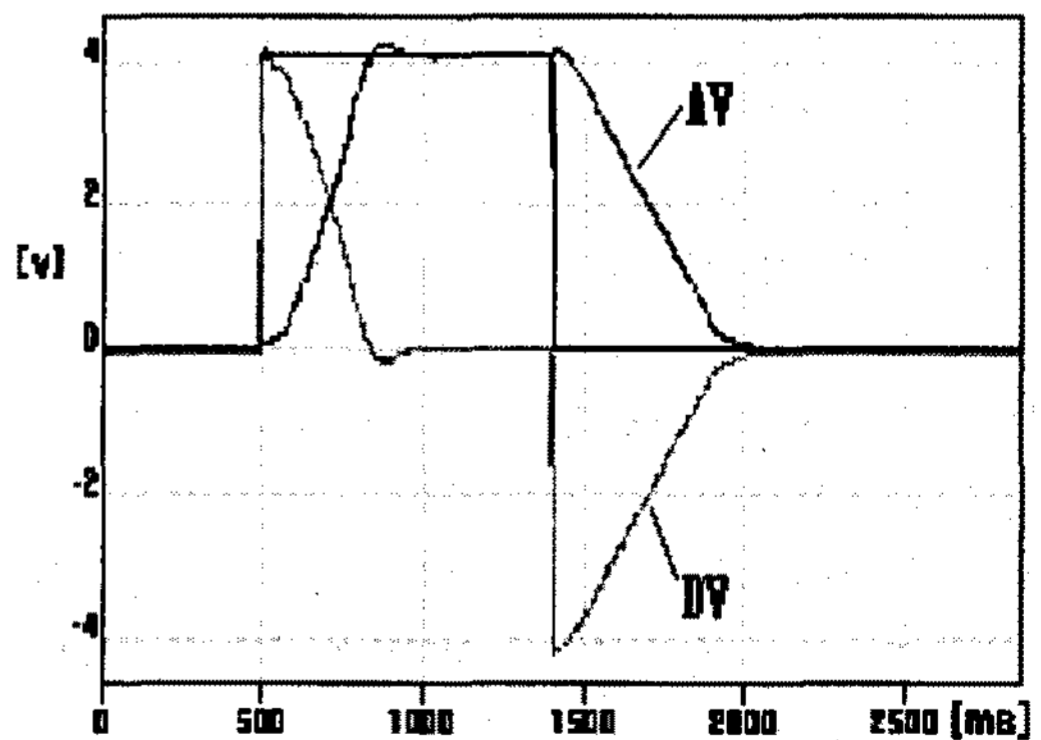


그림 9. 위치응답 특성도($K_p=90$)
 Fig. 9. Position response characteristics to gain change ($K_p=90$)

즉 직립보행로봇에서는 각각의 액추에이터에서 부하가 편측작용 하므로 동작과 복귀 시 응답시간의 차이가 존재함을 알 수 있다. 그리고 Motor power

특성에서는 속도가 없어도 power가 존재하였다. 이는 폐 루프제어에서 정위치를 유지하려는 Braking power가 역방향으로 인가되고 있음을 알 수 있다.

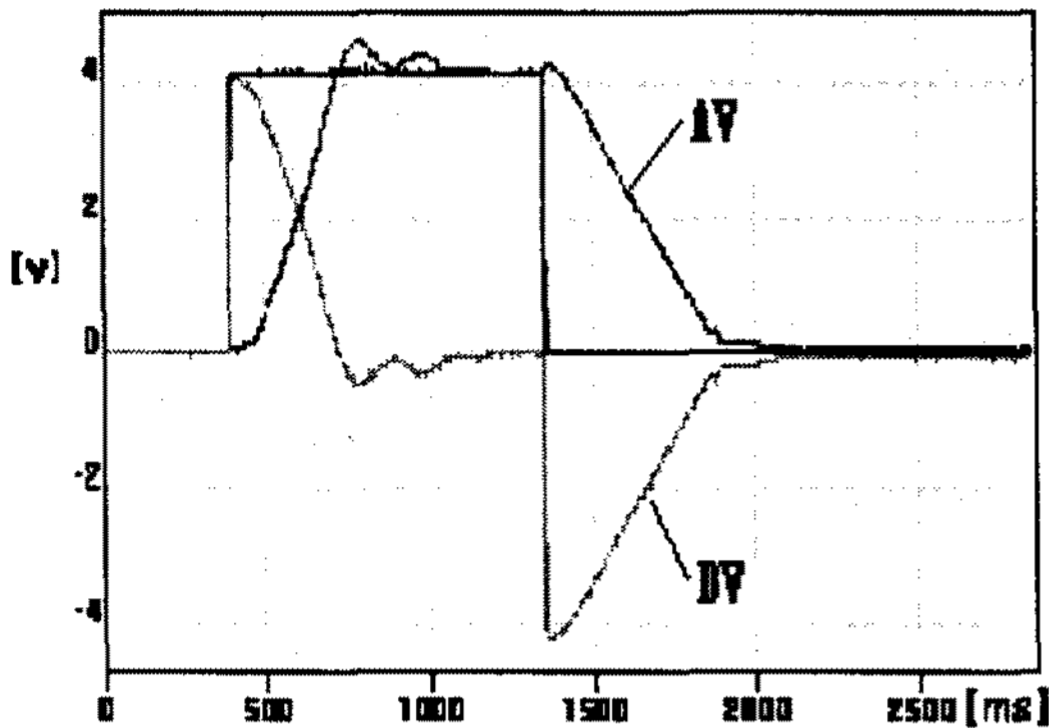


그림 10. 위치응답 특성도($K_p=90, K_i=10$)
Fig. 10. Position response characteristics to gain change ($K_p=90, K_i=10$)

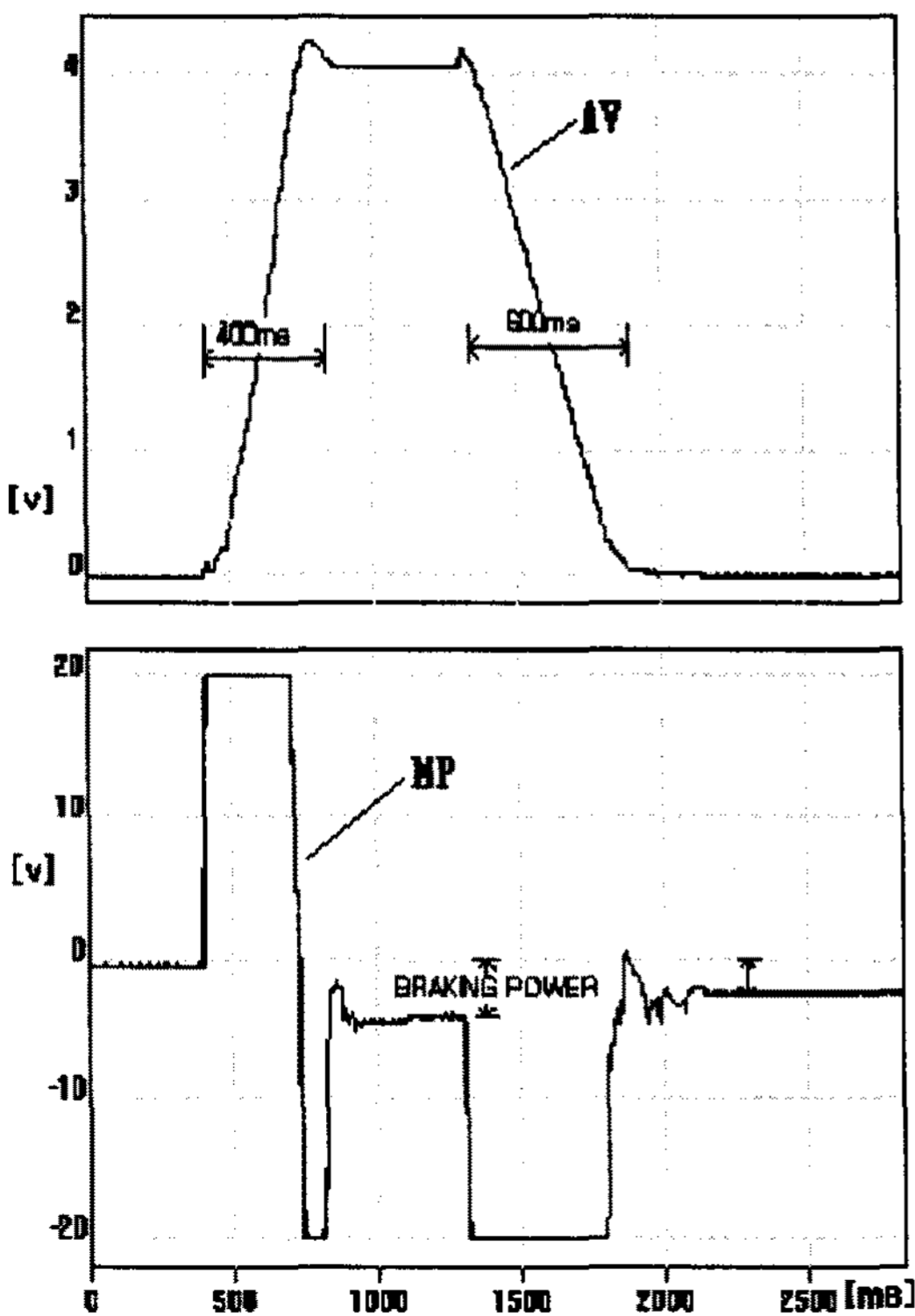


그림 11. 모터전류 특성도($K_p=90, K_i=0$)
Fig. 11. Motor current characteristics to gain change ($K_p=90, K_i=0$)

4. 결 론

본 논문은 지금까지 국내에서 연구가 미진했던 직립보행 로봇을 대상으로 하였다. 구성은 17축 관절, 키 75[cm], 무게 24[kg]의 중형 크기로 독자적인 액추에이터를 적용한 로봇이다. 인간에 가까운 보행동작과 손동작을 할 수 있으며, 음성인식에 의하여 제어되는 지능을 가지고 있다. 이 로봇의 액추에이터 개발 과정에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 직류전동기 서보제어에 사용된 파워앰프(LM12)는 제어성이 우수하고, 소비전력이 적으며, 드라이버의 소형경량화로 로봇본체에 탑재할 수 있었다.
- 2) 서보모터 비례(P)제어 특성실험에서 K_p 값의 증가가 편차를 감소시키며, 빠른 응답을 얻을 수 있다. 하지만 일정값 이상에서 오버슈트가 커지고 초기진동으로 불안정한 점이 발견되었다.
- 3) 직립보행로봇에서는 하중에 의한 편측부하가 작용함으로 동작과 복귀에서 응답시간 차를 발견할 수 있었다. 그리고 로봇의 정자세를 유지하기 위해서는 하중의 역방향으로 Braking power가 필요하다.

그러나 본 연구에서 해결하지 못했던 한계점과 차후 개발해야 할 몇 가지 연구 대상 또한, 발견할 수 있었다.

- 1) 고정자세에서 발생하는 모터의 Braking power는 브러시모터의 국부코일 발열로 인한 소손가능성이 있음을 알 수 있었다.
- 2) 기계적 Backlash발생으로 보행동작에서 흔들림과 불안한 몸동작이 발생하고 있다.

본 연구를 진행하면서 로봇의 기구부 구성과 특성에 맞는 부품을 확보하는데 어려움이 많았다. 그러나 17개의 축 동시제어와 직립보행로봇 완성품을 개발함으로써 로봇에 대한 자신감과 가능성을 확인할 수 있었다. 향후 본 제어알고리즘을 바탕으로 관련축의 연계동작에 대한 연구를 수행하여, 보다 유연하고 인간친화적인 직립보행로봇을 개발하고자 한다.

References

- [1] A. W. Naylor, and R. A. Volz, "Design of Integrated Manufacturing System control Software," IEEE Transaction on System, Man, and Cybernetics, Vol. SMC-17, pp.881~897, 1987.
- [2] 박민용, "로봇 공학", 大英社, 1994.
- [3] 강철규, 권인소, 윤중선, 정완균, "로봇 동역학과 제어", 圖書出版 喜重堂, 1994.
- [4] 성경학, 김진오, 김성권, "공장자동화를 위한 지능로봇시스템," 제어 자동화 시스템공학회지, 제2권 제3호, pp.16~24, 1997.
- [5] Pei-Chong Tang, Shi-shong Lu, "Design and Implementation of Fully Digital DC Servo System Based on a Single-Chip Micro-computer," IEEE Trans. on Ind. Elec. vol. IE-29, No.4, pp.295-298, Nov.1982.
- [6] J.B. Plant. S.J. Jorna, "Microprocessor Control of Position of Speed of a SCR DC Motor Drive," IEEE Trans. on IECI vol. IECI-27, No.3 pp.228~234, Aug.1980.
- [7] S. B. Dewan, A. Stranghen, "Power semiconductor circuits," John wily & sons, Inc. 1975.
- [8] 전금경, "파워 일렉트로닉스와 AC드라이버", 세화, pp.15~358, 1991.
- [9] P. C. Sen "Thyristor D. C. Drive", John wiley & Sons Inc. pp.222~239, 1980.
- [10] 文熙和, "모터제어", KPC, pp.281~310, 1990.

◇ 저자소개 ◇

문진수 (文鎭洙)

1959년 7월 16일생. 2001년 동명정보대학교 공과대학 로봇시스템공학과 졸업. 2003년 부산대학교 공과대학 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정. 1980~1987년 한국중공업(주) 전기부 근무. 현재 대한상공회의소 부산인력개발원 시스템제어과 과장. 주 관심분야는 휴머노이드 로봇, PLC, PMU, CNC공작기계, FMS시스템.

김철우 (金喆禹)

1942년 12월 5일생. 1969년 부산대학교 공과대학 전기공학과 졸업. 1974년 일본 전기통신대학 전자공학과 졸업(석사). 1982년 일본 동경 공업 대학 전기전자공학과 객원교수. 1986년 중앙대학교 전기공학과 졸업(박사). 현재 부산대학교 공과대학 전자전기통신공학부 교수. 본 학회 평의원.