

비례및 미분 제어 이득계수 변화 기법을 이용한 수직형 3축로봇팔의 위치제어기 설계 및 제작

이상훈*, 한석균*, 최병홍**, 이승중***, 김용일*

* 한국과학기술연구원 기전연구부

** 한국과학기술원 정보및 통신공학과

*** 한양대학교 자동차공학과

Abstract

In this paper, we introduce an industrial three degree of freedom manipulator which loads/unloads various freight on an AGV(Automated Guided Vehicle). We design and implement the industrial controller for the manipulator with P-D gain variation method. Since this battery-powered manipulator is often driven in an insufficient power condition, the gravity effects on the robot joints can be a significant problem. The objectives of this paper are twofold: the presentation of a PI-controller which can compensate the gravity effects, and the design and implementation of an industrial three degree of freedom manipulator for loading/unloading.

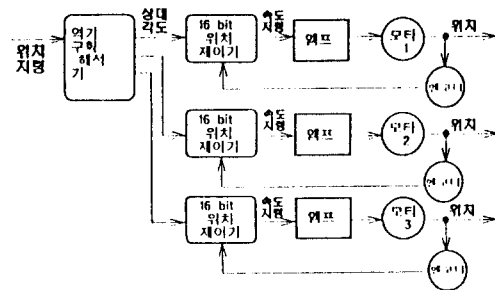
1. 서론

본 논문은 무인반송차량(Automated Guided Vehicle)위에 장착되어 화물을 하역하는 용도의 수직형 3축로봇팔(manipulator)과 그의 제어구조를 설명한다. 또한, 중량물을 다루고 있을 때 떨어지는 제어 성능에 적절히 대응할 수 있도록 제어이득계수를 변화시켜 제어하는 방법을 제시한다.[1]

본 연구에서 다루고 있는 로봇팔은 무인반송차량(AGV)위에 장착되어 화물을 하역하도록 설계 제작되었다. 이 때 로봇팔은 축전지를 이용하여 구동되기 때문에 저전력상태에서 작동되는 경우가 많다. 이러한 조건하에서는 로봇팔이 정상적인 출력을 내지 못하게 되고 제어성능이 낮아지게 된다. 로봇팔이 회전함에 따라 각 링크의 무게중심과 모터 축간의 거리가 달라지게 되고 이것이 팔을 지지하는데 필요한 토크의 변화를 가져오게 된다. 보통의 로봇팔은 충분한 전력상태에서 구동되기 때문에 무시될 수 있는 인자이지만 저전력상태에서 구동되거나 중량물을 하역하는 로봇에 있어서는 상당한 영향을 끼치는 인자가 될 수 있다. 본 논문에서는 이 현상을 해석해 보고 간단한 비례및 미분 제어기의 이득만을 변화시켜 효과적인 대응을 할 수 있는 방법을 제시한다.

2. 제어시스템 구성

2.1 제어구조



<그림 1> 제어시스템의 구조

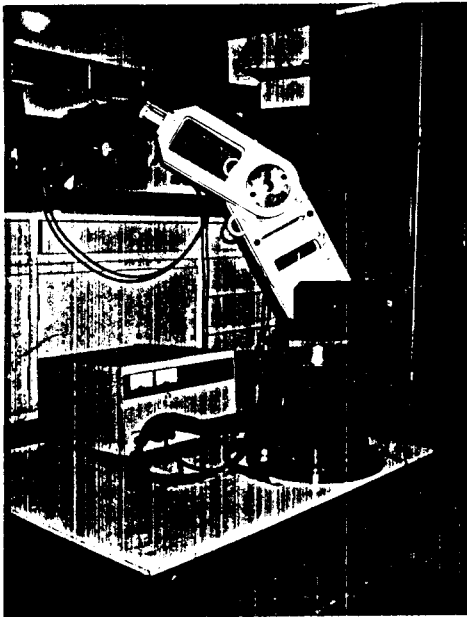
제어시스템은 개인용 컴퓨터(PC/AT 386), 위치제어기, 앰프및 기구부로 구성되어 있다. 개인용 컴퓨터는 역기구해석기의 역할을 하고, 위치제어기는 팔의 각 관절을 담당하고, 앰프는 속도데이터를 제어기로부터 받아 정속도 출력을 낸다.

역기구해석기에서 사용자의 위치지령에 따라 로봇팔의 역기구해석을 하고 경로계획을 세운 후 목표위치를 각 관절의 현재각도와 목표각도의 상대각도로 바꾸어 위치제어기에 전달한다. 각도값은 16비트의 2진수 데이터의 형태로 전달된다. 위치제어기는 주어진 상대각도를 분할하여 속도형태(velocity profile)를 정한다. 이 속도형태는 디지털-아날로그 변환기를 거쳐 전압의 형태로 전달된다. 기구부에 있는 모터에 장착되어있는 엔코더로부터 위치피드백을 하여 이득계수 변화 기법을 이용한 위치제어를 실현한다. 앰프는 주어진 속도값을 항상 유지하도록 모터로부터 속도와 전류값을 받아들여 이용한다. 앰프는 모터의 구동에 해석식 펄스폭변조방식(Pulse Width Modulation)을 사용한다.

2.2 시스템 요소

2.2.1 로봇팔

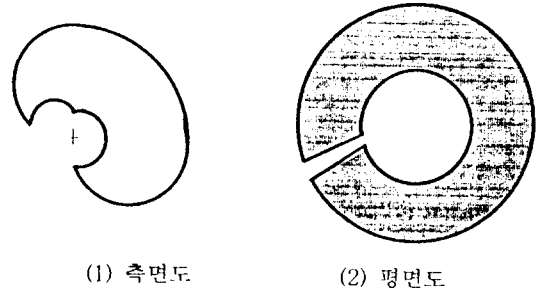
로봇팔은 주로 무인반송차량(AGV)에 장착되어 화물의 하역작업을 하도록 설계되었다. 이 로봇팔은 축전지를 이용하여 구동되기 때문에 저전력상태에서 작동되는 경우가 많다. 이를 고려하여 소형 경량구조를 취하는 등, 축전지 구동을 고려하여 제작하였다. 경량구조를 위하여 소재를 알루미늄으로 하여 가볍게 하였다. 팔의 내부는 비워 골격형으로 만들어 구조에서의 중량의 절감을 생각하여 설계하였다. 로봇팔의 크기에도 고려하여 크기가 작으면서도 가반중량이 크도록 제작하였다. 3축로봇팔로는 완벽한 자세 제어는 되지 않지만 하역작업용으로는 충분한 자유도를 발휘할 수 있는 구조이다. 3축으로 3자유도를 가지며 작업영역에 경제적으로 도달할 수 있다. 30kg까지의 중량물을 다룰 수 있으며 ± 0.5 mm의 반복정밀도를 가진다. 소비전력은 1.2 kW이하이다.



<그림 2> 로봇팔

2.2.2 모터부

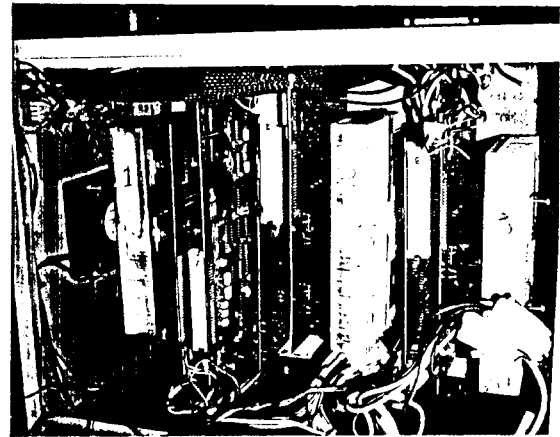
구동하는 모터는 일본 다이토(DAITO)사의 직류, 서보모터를 사용하였다. 소비전력은 0.3kW, 정격전압은 75V, 분당회전수는 3000rpm, 출력토크는 9.74 kg·cm이다. 모터에는 1000펄스출력의 엔코더가 달려있다. 감속기는 하모닉드라이브(50:1)를 사용하였다.



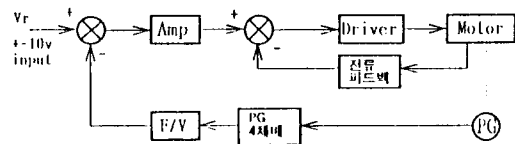
<그림 3> 로봇팔의 작업영역

2.2.3 정속도 출력 앰프

제작된 정속도 출력 앰프는 제이기로부터 전압으로 변환된 속도값을 받아 전류피드백, 속도피드백을 하여 정속도를 내는 구조로 되어있다. 그 구조는 <그림 4>, <그림 5>와 같다.



<그림 4> 정속도출력앰프



<그림 5> 정속도출력앰프의 구조

이 앰프는 정격전류 5A, 전압 75V라는 조건에서 동작할 수 있도록 제작되었다. 특히 모터구동부(Driver)에서는 기존의 파워 트랜지스터(power transistor)나 파워 전계효과트랜지스터(power FET)를 사용하는 대신 도시바사의 절연게이트바이폴라 트랜지스터(IGBT : Insulated Gate Bipolar Transistor)를 사용하여 성능을 향상시켰다.

IGBT는 높은 주파수에서 고전력을 스위칭하는데 사용되도록 만들어진 것으로, 그의 특징으로 첫째는 이 모듈은 입력단은 MOS FET의 특성을 갖고, 출력단은 바이폴라 트랜지스터의 특성을 갖는 것이다. 이로 인해 입력단은 높은 입력임피던스를 갖게 되어 적은 전류로도 쉽게 구동할 수 있다. 또한 출력단에는 통전시의 전류손실이 적어져서 높은 전류를 사용할 수 있게 해준다.[2] 이런 특징으로 인하여 본 연구에서 제작한 앰프에서 사용하였다.

직류모터로 동작되는 로봇구동부로서 매우 안정되고 고효율의 정속도 앰프를 제작하였다.

2.2.4 위치제어기

본 연구에서는 16비트 단일칩 마이크로컨트롤러(single chip microcontroller)를 이용하여 로봇팔의 위치제어를 실현하도록 하였다. 위치제어기로 사용하는 제어기는 다목적으로 산업용 제어에 사용할 수 있도록 제작하였다.

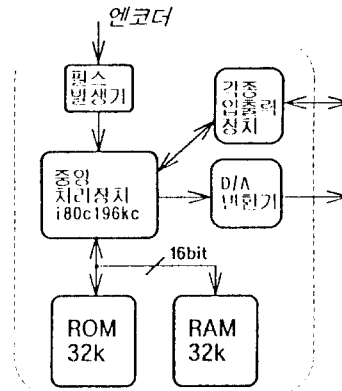
마이크로프로세서는 인텔사의 80c196kc 단일칩 마이크로컨트롤러를 사용하였다. 이것은 고성능의 16비트 마이크로컨트롤러로, 저 소비전력의 특징을 가지고 있다. 또한 레지스터<레지스터(register to resister)구조를 가지고있어 누산기가 필요 없고, 칩내의 직렬포트, 아날로그/디지털변환기, 세계의 진폭변조출력, 48개의 입출력라인 그리고 고속 입출력장치들을 직접 제어할 수 있어 산업용 제어기로 매우 적당한 단일칩 마이크로컨트롤러이다.[3]

본 연구에서 제작한 제어기는 <그림 6>에서와 같고, 블록도는 <그림 7>과 같다.

메모리는 롬(Read Only Memory) 32kbyte, 램(Random Access Memory) 32kbyte를 사용하였고, 12MHz의 시계주파수를 사용하였다. 입출력 포트를 최대한 확장시키므로써 다목적인 산업용 제어기가 되도록 설계했다. 엔코더입력을 직접 받을 수 있도록 하였고, 직류및 교류모터 모두 제어할 수 있도록 하였다. 본 제어기에서는 디지털-아날로그 변환기를 함께 하나의 회로기판으로 제작하여서, 구동부에 전송할 속도값을 전압, 펄스폭변조, 혹은 펄스로 전송할 수 있도록 설계하여 서로 다른 입력값을 갖는 구



<그림 6> 위치제어기와 제어상자



<그림 7> 위치제어기의 구조

동부를 접속할 수 있어 손쉽게 각종 제어에 사용될 수 있도록 하였다. 그리고 다른 시스템과의 통신을 위해 RS232C 직렬통신이 가능하다.

2.2.5 제어기 상자

제어기상자에는 위치제어기와 앰프가 설치되어 있고, 비상정지스위치, 전원스위치등의 스위치, 역기 구하해석기와의 통신을 위한 포트, 로봇팔의 각관절과의 통신을 위한 3개의 연결구등이 장착되어있다. 그리고, ±12V, +5V, 10A의 출력을 내는 정전압 전원모듈이 추가로 장착되어 있다. 모터를 구동하는 전원은 축전지에서 제어기상자를 거쳐 곧바로 모터에 투입된다. 제어기상자내의 발열을 방지하기 위한 팬을 2개 장치하였다. <그림 6>

3. 중력효과에 의한 팔지지 토크변화

3.1 로봇팔의 동역학

서론에서 언급한 중력의 효과는 하역로봇인 경우 중량물을 다루기 때문에, 로봇팔이 화물(Payload)을 들고 있을 때에는 더욱더 분명하게 나타난다. 또한, 본 연구에서와 같이 로봇팔이 무인반송차(AVG) 등에 장착되어 독립운행을 할 경우 축진지를 이용하여 구동하게 되는데, 이때에는 전작업시간동안 로봇팔에 충분한 전력을 공급해주지는 못하게 된다. 이렇게 정격전력이하의 조건에서 작동하는 경우 또한 중력에 의한 팔 지지토크의 변화가 크게 나타나고 제어성능이 낮아지게 된다. 이러한 현상을 중력의 영향을 고려하여 해석해본다.

다중링크 로봇 매니플레이터의 거동을 설명해주는 행렬방정식은 다음과 같다.[1]

$$\tau - [I(\theta)\ddot{\theta} + f(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta)] = 0 \quad (1)$$

여기서 τ 는 액츄에이터 토크의 열 벡터(column vector)이고, $I(\theta)$ 는 매니플레이터의 관성텐서행렬(inertia tensor matrix), $f(\theta, \dot{\theta})$ 는 코리올리 와 구심효과로 인한 비선형 함수, 그리고 $G(\theta)$ 는 중력항이다. 여기서 중력항은 본 논문에서 다루고자하는 중요한 항인데, 보통 θ 의 비선형함수이다.

위 식(1)과 이후의 식에 나오는 각도표현은 특별한 지정이 없는 한 수평면에 대한 각도-절대각도를 칭함-를 나타내는 것으로 한다.

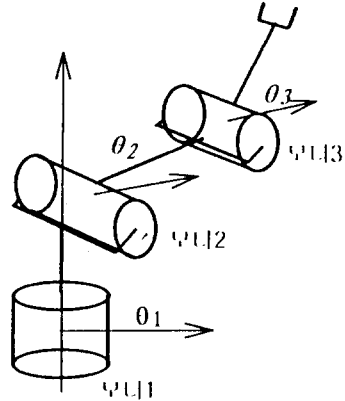
중력가속도에 의한 토크 손실을 보상해주는 방법은 카운터메스를 이용하는 법, 또 다른 액츄에이터를 첨가하여 조절하는 법 등 몇 가지가 연구되어 있으나 보통 별도의 비용및 노력이 필요하다.

3.2 팔의 각도에 따른 중력효과

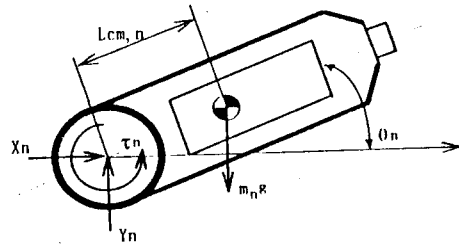
본 연구에서는 손실토크의 직접적인 보상을 하지 않고, 이 손실 항을 해석하여 비례및 미분제어기를 이용한 위치제어에 이용하고자 한다.

<그림 8>은 중력효과를 해석하기 위하여 3축 로봇팔의 거동을 표현하고 있다. 여기서 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 은 절대각도를 나타내도록 하였다. 그러므로 θ_1 은 항상 0이 된다.

<그림 9>는 일반적인 표현으로 끝단의 모터 n 과 n 번 링크의 자유물체도이다. 여기서 X_n, Y_n 은 수직 수평력을 나타내고, $L_{cm,n}$ 은 무게중심까지의 거리, m_n 은 n 번 링크의 질량, θ_n 은 n 번 링크의 중심선과 수평면과 이루는 각도이다.



<그림 8> 로봇팔의 거동



<그림 9> 끝단 링크의 자유물체도

정적평형을 생각하면,

$$X_n = 0$$

$$Y_n = m_n g$$

$$\tau_n = m_n g L_{cm,n} \cos \theta_n \quad (2)$$

가 되고, 이를 이전($n-1$)링크에 적용시키면,

$$X_{n-1} = 0$$

$$Y_{n-1} = m_{n-1} g + Y_n = (m_{n-1} + m_n) g$$

$$\tau_{n-1} = (m_{n-1} L_{cm,n-1} + m_n L_{n-1}) g \cos \theta_{n-1} \quad (3)$$

이 된다.

식 (2),(3)을 일반화시키면,

$$\tau_j = [m_j L_{cm,j} + L_j M_{j+1}] g \cos \theta_j \quad (4)$$

$$\text{여기서, } M_i = \sum_{k=i}^n m_k \text{이다.} \quad (5)$$

로봇팔의 링크를 지지하기 위한 토크는 링크와 모터의 무게길이의 항에 절대각도 θ_j 의 코사인 값이 곱하여져 있다.

여기서 DC 서보모터의 일반화된 전달함수를 도입하면,[4]

$$\frac{\hat{\Theta}_j(s)}{E_a(s)} = \frac{K_m}{s(T_m s + 1)}, \quad \hat{\Theta}_j(s) \text{는 제어각} \quad (6)$$

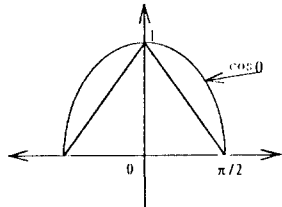
여기서 $K_m = K/(R_{ab} + KK_b)$
 ; 모터 이득 상수
 $T_m = R_a J / (R_{ab} + KK_b)$
 ; 모터 시정수

모터의 출력 토크의 값이 관절의 절대각도에 따라 변하게 된다. 따라서 위의 모터계는 관절각에 종속되는 비선형성을 가진다.

3.3 중력인자

제어기의 비례 및 미분 이득상수를 모터계의 변화에 적절히 대응시켜 간단히 모터계의 변동을 보상하는 제어기를 설계하려고 한다.

위의 식(4)와 <그림 9>에서 θ_j 의 항 $\cos\theta_j$ 는 모터중심축과 링크의 무게중심간의 거리변화를 나타내는 것을 알 수 있다. 또한 부하를 다루고 있을 때에는 부하와 링크를 합한 것의 무게중심과의 거리가 된다. 이것을 직선으로 선형화 하면 절대각도는 $(-\frac{\pi}{2} \leq \theta \leq \frac{\pi}{2})$ 의 범위에 있으므로 다음과 같다.



<그림 10> 코사인 함수의 선형화

$$\cos \theta \approx 1 - \frac{2}{\pi} \theta \quad (0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}), \quad (7)$$

$$\approx 1 + \frac{2}{\pi} \theta \quad (-\frac{\pi}{2} \leq \theta \leq 0)$$

$$F_g = 1 - \frac{2}{\pi} \theta, \quad 1 + \frac{2}{\pi} \theta \quad (8)$$

각각 $(0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2})$ 일 때, $(-\frac{\pi}{2} \leq \theta \leq 0)$ 일 때.

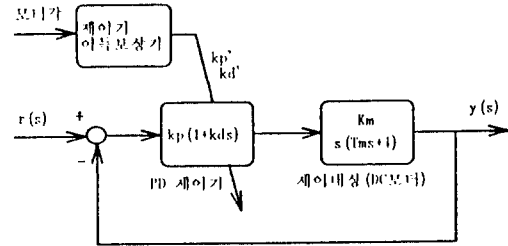
본 논문에서는 식(8)의 F_g 를 중력인자(gravity factor)로 정의하여 사용하기로 한다. 계의 비선형성을 제거하기 위하여 중력인자를 제어 이득에 포함시켜 제어이득을 보정한다.

3.4 이득계수 변화기법

중력인자를 사용하여 모터 각각의 제어기에 적용되는 이득계수 G'_i 는,

$$G'_i = (1 + w_r F_g) G_{i \text{ ork}} \quad (9)$$

와 같이 된다. 여기서 w_i 는 제어기의 여러 이득간의 가중치를 고려한 값이다. 비례 및 미분 제어 이득계수 변화기법을 이용한 위치제어의 블럭다이어그램을 살펴보기로 한다.



<그림 11> 비례 및 미분 제어 이득계수 변화 기법을 이용한 위치제어

3.4.1 이득계수변화알고리즘

<그림 11>에서 비례 및 미분 제어기의 이득 k_p, k_d 를 중력인자 F_g 를 이용한 '제어기 이득보상기'로 보상하고 있다. 여기에 쓰인 이득계수변화 알고리즘은 각도범위 $(0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2})$ 일 때,

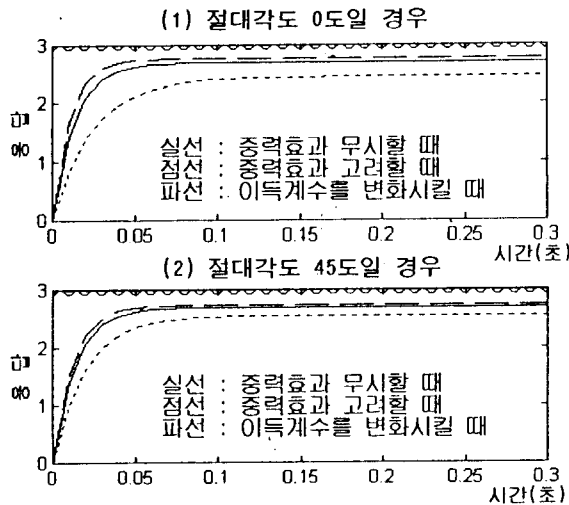
$$k_p = (1 + 0.3(1 - \frac{2}{\pi} \theta)) k_{p \text{ ork}} \quad (10)$$

$$k_d = (1 + 0.7(1 - \frac{2}{\pi} \theta)) k_{d \text{ ork}} \quad (11)$$

이다. 위 식에서 $w_p = 0.3, w_d = 0.7$ 로 하였다. 여기서 수평면에 대한 관절의 각도(절대각도) θ 는 제어기의 별도의 메모리 내지는 레지스터에 저장하고 인산해야 한다. 본 연구에서 사용된 제어기는 이전각도와의 상대각도만을 역기구학해석기인 PC로부터 받아 사용한다. 절대각도는 초기값이 설정된 후에 상대각도를 가감하기만 하면 쉽게 구할 수 있다.

3.5 결과

이렇게 이득계수를 변화시켜 제어한 결과 모터계의 상수가 변화되기 전의 제어응답과의 차이가 거의 없는, 모터계가 변화된 후의 응답보다 상당히 개선된 응답을 얻을 수 있었다.



<그림 12> 단위계단입력에 대한 응답

4. 결론

본 연구에서는 무인반송차량에 장착되어 화물의 하역작업을 하는 산업용 3축 로봇팔의 제작과 로봇팔의 위치제어를 하기위한 제어를 설명하였다.

하역용으로 쓰이는 3축 로봇팔에 있어서 관절각의 변화에 따른 중력효과는 크게 나타나게 된다. 본 연구에서는 이 효과를 수학적으로 해석해 보고 이에 관한 중력인자를 정하여 중력인자를 이용하여 제어이득을 변화시켜 향상된 응답을 얻을 수 있다는 것을 알았다.

현재 로봇팔의 속도제어기를 설계 제작한 후 위치제어기를 제작하는 과정에 있는 관계로 속도 제어기에서 사용하던 비례 및 미분제어기를 사용하였다. 위치제어에서 정상상태오차를 없애는데 필요한 적분요소를 첨가하면 더 향상된 제어기를 만들 수 있다.

5. 감사의 글

본 연구에서 정속도앰프의 설계 제작, 전기·전자 분야에 관한 많은 자문과 도움을 주신 송태오선생님과, 기계기술분야에서 도움을 많이 주신 노덕문선생님, 그리고 여러가지면으로 깊이 도와준 우성우, 김상조씨에게 깊은 감사를 드린다.

9. 참고문헌

- [1] Nathan Ulrich, Vijay Kumar 1991, "Passive Mechanical Gravity Compensation for Robot Manipulators", of the 1991 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Sacramento, California-April, pp. 1536-1541
- [2] DATA BOOK, "GTR MODULE(IGBT)", TOSHIBA corp., 1991
- [3] "Intel 16bit Embedded controller handbook", Intel, 1990
- [4] Ogata, "Modern Control Engineering" 2nd edition Prentice-hall, 1990
- [5] Craig "Introduction to Robotics Mechanics and Control", 2nd edition, Addison-Wesley, 1989
- [6] 김종식 "선형 제어시스템 공학", 淸文閣, 1988