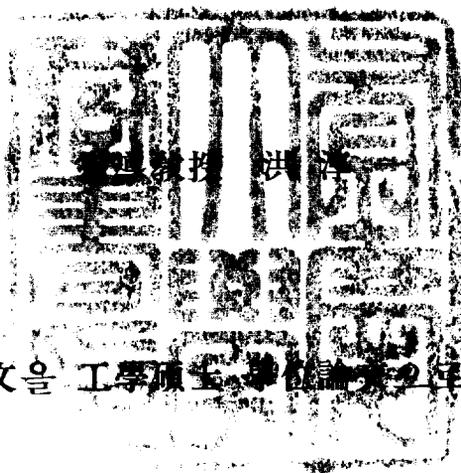


工學碩士學位論文

전차 트로리선 가설 작업로봇의
이동제어



이 論文을 工學碩士學位論文 2年 提出함

2006 年 2 月

釜慶大學校 産業大學院

電氣工學科

朴 鍾 善

朴鍾善의 工學碩士 學位論文을 認准함

2005 年 12 月

主審 工學博士 李 東 喆 (印) 

委員 工學博士 裴 鍾 一 (印) 

委員 工學博士 洪 淳 一 (印) 

목 차

목차	i
표 목차	iv
그림 목차	v
Abstract	vii
제 1 장 서 론	1
1.1 연구배경	1
1.2 연구목적 및 필요성	2
1.3 연구내용	4
제 2 장 작업모델 로봇	6
2.1 케이블 가설 원리	6
2.2 장력제어부	8
2.3 이동시스템	10
제 3 장 이동시스템 제어모델	12
3.1 작업로봇의 이동시스템	12
3.2 전동기 속도제어 모델	14
3.2.1 전동기의 모델	14
3.2.2 전류제어	18
3.3 속도제어	20

3.4 이동과 장력의 비간섭화	23
제 4 장 이동시스템의 설계	26
4.1 로봇 이동시스템	26
4.2 이동 방식	29
4.3 H형 전동기 구동회로	30
4.4 속도검출	34
4.5 제어회로	36
4.5.1 PWM 발생회로	36
4.5.2 인터럽트 펄스 발생회로	37
4.5.3 카운터 회로	38
4.6 I/O 포트	40
4.7 정수의 결정	43
4.7.1 전동기 부분의 정수	43
4.7.2 전류 피드백 정수	43
4.7.3 그 외의 정수	47
4.8 치차비의 선택	47
제 5 장 시뮬레이션	50
5.1 시뮬레이션 환경	50
5.2 시뮬레이션 방법	53
5.3 시뮬레이션 결과	54
5.3.1 속도 스텝응답	54

5.4 속도지령 값에 의한 시뮬레이션	58
제 6 장 실험결과	60
6.1 실험방법	60
6.2 실험결과	60
제 7 장 결 론	66
참 고 문 헌	67

표 목차

표 1	Power Wheeled Steering 방식	30
표 2	스위치에 의한 전동기 제어	31
표 3	전동기 회전방향	36
표 4	회전방향	39
표 5	포트 할당	42
표 6	파라미터 및 변수기호와 단위	52
표 7	전동기 정수	52
표 8	제어 파라미터 값	52
표 9	기타 정수	53

그림 목차

그림 2.1 케이블 가설 원리	6
그림 2.2 케이블 가설 작업로봇 모델	7
그림 2.3 장력제어부	8
그림 2.4 Load cell 내부회로	8
그림 2.5 장력제어 과정	10
그림 2.6 이동계의 외형도	11
그림 3.1 작업로봇 이동 모델	12
그림 3.2 직류전동기 회로	15
그림 3.3 전기적관계 블록선도	17
그림 3.4 기계적관계 블록선도	17
그림 3.5 직류전동기 블록선도	18
그림 3.6 속도제어계 기본구성	20
그림 3.7 제안한 속도제어 블록선도	22
그림 3.8 차륜구동부 블록선도	22
그림 3.9 비간섭 속도제어부 블록선도	24
그림 4.1 이동시스템의 구성	26
그림 4.2 회로구성	27
그림 4.3 이동로봇의 좌우 동륜의 속도 서보계	28
그림 4.4 H형 트랜지터 전동기 구동회로	30
그림 4.5 포토 카플러	32
그림 4.6 기본 증폭회로	32
그림 4.7 설계한 H형 구동회로	34
그림 4.8 PWM 발생회로	37

그림 4.9 인터럽트 펄스 발생회로	38
그림 4.10 카운터 회로	40
그림 4.11 I/O 포트 회로	41
그림 4.12 MP88 전용 I/O 포트 회로	42
그림 4.13 전류 피드백	44
그림 4.14 샘플·홀드 원리	46
그림 4.15 정상상태 운전점	49
그림 5.1 PI제어기를 포함한 속도제어 블록선도	50
그림 5.2 스텝 입력전압에 대한 1차 지연 근사화 속도응답	55
그림 5.3 스텝 입력전압에 대한 실측 속도응답	55
그림 5.4 전동기 직류이득 특성	56
그림 5.5 이동계의 스텝입력 전압에 대한 속도응답 시뮬레이션	57
그림 5.6 전동기 직류 이득 특성 시뮬레이션	57
그림 5.7 대형 속도지령에 대한 이동계의 응답	59
그림 5.8 삼각 속도지령에 대한 이동계의 응답	59
그림 6.1 15[V] 스텝입력에 대한 실속도와 1차 지연 근사화의 속도응답 ..	61
그림 6.2 15[V] 스텝입력에 대한 속도응답의 확대도	61
그림 6.3 15[V] 스텝입력에 대한 전류응답	62
그림 6.4 대형속도 지령에 대한 속도응답	63
그림 6.5 대형속도 지령에 대한 전류응답	63
그림 6.6 삼각형 속도지령에 대한 속도응답	64
그림 6.7 삼각형 속도지령에 대한 전류응답	64
그림 6.8 완만대형 속도지령에 대한 속도응답	65
그림 6.9 완만대형 속도지령에 대한 전류응답	65

Mobile Control for Installed Working Robot of a Trolley Line of an Electric Train

Jong-Sun Park

*Department of Electrical Engineering
Graduate School of Industry
Pukyong National University*

Abstract

The number of cable, Troy Line, to supply electricity to the electric railroad must be increased in order to maintain constant tension. This study discussed driving of the robot that persistently maintains the pulling-tension power of a cable when a cable- loaded train pulls the cable during driving.

The cable can not be pulled constantly unless the train is not driven at regular velocity. For this reason, the robot has to control the velocity. The value of parameter is decided by composing and modeling of the auto a meter in order to control the velocity in robot driving.

Appeared about necessary D.C. motor model and control method to move wheels in work robot. Also, did simulation before seek function of move wheels drive department.

And velocity control system that think here investigated useful in transfer of work robot.

제 1 장 서 론

1.1 연구배경

최근 Mechanism과 Electronics에 의한 Mechatronics 공학의 발달로 산업 현장에서 기계의 제어를 전자화 함으로써 성능의 고도화가 가능하게 되었다. 종래의 기계는 다수의 기구·구조부품으로 구성되어 있고 고성능이 요구되지 않았다. 또한 기구나 구조부품에 의존하는 기계에서는 사양의 변경에 대하여 유연성이 없는 결점이 있었다.

이것에 대하여 메카트로닉스적 기계 시스템은 기계적으로 구성하기 쉽고 제어와 정보처리 부분을 분리하고 그 기능을 분해하여 센서, 정보처리부, 액추에이터 등으로 치환함으로써 제어성과 사양에 대한 유연성이 있다[1].

최근, 인간을 나쁜 작업상황이나 단순 작업에서 해방시키는 것으로 생산 시스템의 자동화, 자동기계 또는 그 기계를 제어하는 자동제어 이론이 이전부터 연구되어 실용화되고 있다.

종이의 제조, 플라스틱의 제조, 케이블의 가공, 로프의 가공 등에서 장력을 일정히 제어하는 것도 자동화의 한 부분이다[2].

인간에게 위험한 작업이나 출입이 불가능한 장소에서의 작업은 로봇이 작업을 행하고 인간이 위험에 노출되지 않기를 희망한다. 그러나 현실적으로 인간이 행하고 있는 모든 작업을 로봇이 행하도록 하는 것은 많은 문제점이 있기 때문에 한정된 장소에서만 작업로봇을 이용하고 있다.

현재 인간을 대신하여 모든 작업을 행할 수 있는 로봇의 개발이 어려운 것은 많은 작업을 동시에 행할 수 없기 때문이다. 하나의 작업은 로

봇에 있어서 매우 간단한 것도 복수개의 작업을 조합으로 하면 상호간의 작업이 복잡한 영향을 미치게 되어 로봇에서는 어려운 작업이 된다. 그러나 많은 어려움이 있는 것 중에서 로봇이 출현하여 작업하는 분야가 많이 있을 수 있다.

제어이론이 공학에 응용된 이래 많은 발전을 하여 왔고 최근 컴퓨터의 발달도 눈부시게 발전하고 있다. 이에 힘입어 제어에 유연성이 있는 퍼지제어는 최근 인공지능 로봇이나 작업로봇 등의 제어에 응용되고 있고 실제 산업현장에서 퍼지제어를 이용한 제품이 많이 생산되고 있다 [2,3].

인간을 대신하여 위험한 장소에서 작업하는 작업로봇은 작업하여야 할 작업대상이 복잡적이고 정성적인 제어량이 많아 이것들에 대한 제어는 종래의 **PID** 제어와 퍼지제어를 혼합한 제어가 많이 연구되고 있다[2,4].

1.2 연구목적 및 필요성

메카트로닉스의 대표적인 응용은 로봇의 개발이고 특히 생산업체에서 인건비 절감과 생산품질의 향상을 위해서 생산라인의 자동화와 함께 작업로봇의 개발이 요구되고 있다. 이러한 배경 아래 산업용 로봇은 용접, 도장, 운송, 조립 등 여러 분야에 응용되어 자동화 추진의 중요한 역할을 하고 있다[4].

전차 등에 전력을 공급하기 위하여 케이블을 필요로 한다. 그러나 이 케이블을 당기는 작업은 그렇게 간단한 것이 아니다. 케이블이 느슨하지 않고 또한 케이블이 끊기는 한계를 장력이 넘지 않게 하기 위해 적당한 장력을 주면서 가선하지 않으면 안 된다. 이 경우 장력제어가 필요로 하게 되는 것이다.

지금까지의 작업은 방호구를 입고, 무거운 도구를 허리에 걸쳐, 사다리나 타워 위에서, 사람 손에 의해 작업하는 것이 당연한 것이었다. 또, 체력을 사용하여 항상 감전, 추락의 위험이 따르고 있었다. 이 때문에 작업의 효율화와 같이 최적의 장력으로 케이블을 당기기 때문에 이것을 자동화해서 장력을 유지하면서 케이블을 자동 가설하는 장치의 개발이 기대되는 것이다.

구체적으로, 이 케이블의 한 끝을 고정하고, 다른 한끝을 수레차로 당기는 작업로봇 모델을 생각하게 되었다.

빌딩, 공장, 아파트 등에서 로봇은 일반적으로 순회 감시하면서 안전 점검을 하지만 방사능이 발생할 가능성이 있는 장소, 전주 위의 가선작업을 하는 장소 등과 같이 인간의 접근이 쉽지 않은 장소의 작업은 인간을 대신하여 작업할 방재로봇의 연구가 많이 진행되고 있다.

인간을 대신하여 순회 할 다리에 해당하는 구동장치, 이상 사태가 발생하면 감시할 눈에 해당하는 CCD 카메라, 이상 사태가 발생하면 알려주는 입에 해당하는 통신회로, 이것을 제어하는 두뇌에 해당하는 CPU 등으로 구성된 방재용 로봇이 있다.

전차선 케이블을 가설할 경우 당연히 케이블의 신장과 바람 등에 의해 케이블의 흔들림이 외란으로 된다. 또, 케이블 장력장치를 실은 수레차를 이동 할 때 통과하는 지면의 요철이나 지면과의 마찰 등도 외란으로 들어온다. 이와 같은 조건하에서 케이블을 느슨하게 하지 않게 또는, 끊어지지 않을 정도의 힘으로 힘껏 당기는 것이다.

그래서 외란이 생기는 영향을 고려한 제어가 필요로 한다. 로봇의 차륜구동부에 필요한 속도제어, 케이블을 당기는 부분에 장력 제어를 하고, 외란의 영향을 가능한 받지 않도록 설계한다.

특히 전차 트로리선 가설공사는 가설되는 케이블의 장력을 일정히 유지하면서 케이블이 감긴 드럼에서 케이블을 풀어야 하는 복합작업이다. 따라서 이러한 복합작업을 하는 작업로봇은 고전적 제어 이론만을 적용하여서는 제어성능을 충분히 발휘하기가 어렵기 때문에 제어규칙에 유연성이 있는 퍼지제어를 적용할 필요가 있다.

현재 케이블 가설공사나 로프 제조공정은 복합작업이고 인간을 대신할 정도의 복합작업을 할 수 있는 장치가 개발되지 않고 제어방식도 아직 확립되지 않은 것이 현재의 상황이다.

연구배경에 언급한 것과 같이 얼마간의 작업을 복합적으로 행하도록 제어방식을 확립하는 것이 위험지대 등에서 작업을 인간을 대신하여 로봇이 행하기 위한 절대조건이 있다. 이것을 위해서 복합작업을 위한 제어방식을 확립하고 많은 시행착오와 Know how의 축적이 필요하다. 본 연구의 목적은 인간을 대신하여 순회 할 다리에 해당하는 이동로봇의 구동장치에 관하여 연구한다.

1.3 연구내용

본 연구의 목표는 전차선 케이블 가설 작업로봇의 이동제어 시스템의 설계이다.

철도에 사용되고 있는 케이블(팬더 그래프가 접촉되어 있는 전선이라고 함)을 사람 손을 사용하지 않고 당기기 위해 케이블을 실은 운반차를 움직이면서 케이블을 끌어당기고 또한 케이블을 끌어당기는 장력을 일정하게 유지하는 로봇을 제작한다. 이 로봇은 크게 나누어 장력제어부와 차륜구동부로 나눌 수 있다.

전차선 가설 로봇은 어느 일정의 속도로 진행하지 않으면 케이블이

확실하게 당겨지지 않는다. 그 때문에 로봇에 속도제어가 필요하게 된다. 이 논문은 차륜구동부의 이동제어에 관해서 기술한다. 이동로봇의 속도제어를 위해서 로봇의 이동제어 시스템의 구조를 설계하고 각 파라미터 등의 값을 결정한다.

제 2장은 전차선 케이블 자동가설 시스템의 원리를 나타내고 가설 작업로봇의 구조를 나타내었다. 3장에서 차륜을 이동하기 위해 필요한 직류전동기의 구동에 대해서 서술하였다. 4장에서 시뮬레이션에 필요한 차륜구동부의 전달함수를 구하고 5장에서 실제로 로봇을 움직이기 전에 시뮬레이션을 행하여 구성된 속도제어 시스템이 작업로봇의 이동에 유용한 것을 구명하였다.

이 논문은 2005년도 한국 조명·전기설비학회 춘계 학술대회와 2005년 대한 전기학회 제36회 학술대회에 발표를 하였으며 논문집에 게재 하였습니다.

제 2 장 작업모델 로봇

본 장에서는 전차 트로리선 가설작업의 효율화와 최적의 장력으로 케이블을 당겨야 하기 때문에 이것을 자동화해서 장력을 유지하면서, 케이블을 자동 가설하는 작업로봇의 구성에 대하여 나타낸다. 전차 트로리선을 가설하는 작업모델 로봇은 이동과 와이어의 정장력 유지라고 하는 2개의 동작을 동시에 행하는 것이고 작업로봇의 구성에 관하여 기술한다.

2.1 케이블 가설 원리

그림 2.1은 케이블의 한 쪽 끝을 고정하고, 다른 한끝을 수레차로 당겨서 전차선 케이블을 가설하는 모델을 나타낸다.

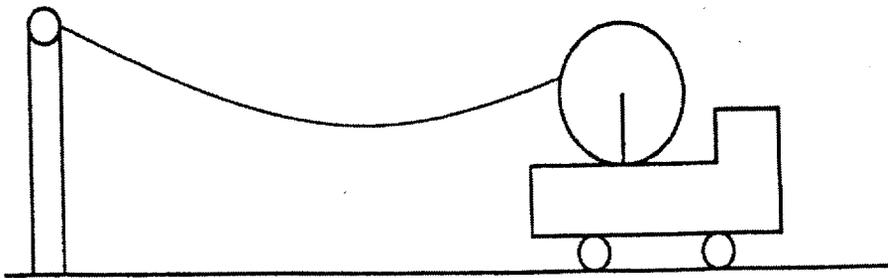


그림 2.1 케이블 가설 원리

케이블 가설 작업의 경우 당연히 케이블의 신장과 바람 등에 의해 케이블의 흔들림이 외란으로 되고 또한 케이블 장력장치를 실은 수레차를 이동 할 때 통과하는 지면의 요철이나 지면과의 마찰 등도 외란으로 들어온다. 이와 같은 조건하에서 케이블을 느슨하게 하지 않고 또한 끊어지지 않을 정도의 힘으로 힘껏 당겨야 한다.

그러므로 이 작업모델은 외란의 영향을 고려한 제어가 필요하고 작업 로봇의 차륜구동에 필요한 속도제어, 케이블을 당기는 부분에 장력 제어를 하고 외란의 영향을 가능한 받지 않도록 설계한다.

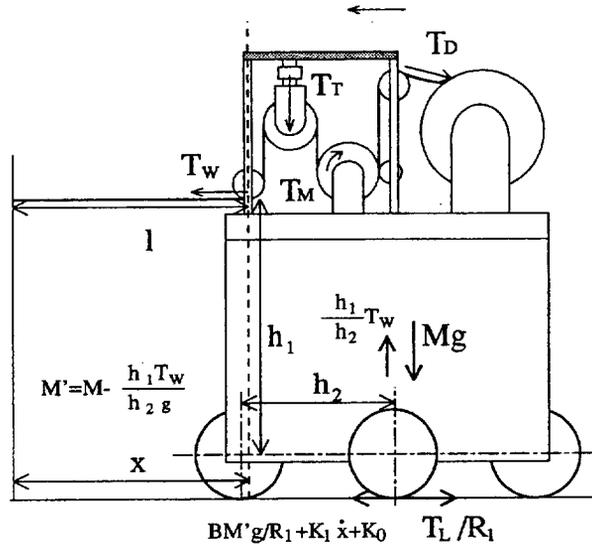


그림 2.2 케이블 가설 작업로봇 모델

작업로봇은 이동하는 차대부분과 장력유지 부분의 2개의 기구와 제어기로 되고 각각의 장치는 전기적으로 접속을 행하고 항상 각각의 상태를 파악할 수 있도록 한다. 하지만 이번은 각각의 부분에 파악하는 기구를 달기에는 하드웨어적인 어려움이 있기 때문에 하나의 제어기에 의해 총괄적으로 상태를 파악하게 된다. 이 후, 각각의 장치를 이동계, 장력계 및 제어기라 부르기로 한다.

그림 2.2는 가선을 당기는 로봇의 전체도를 나타낸다. 이 로봇은 하륜 구동부 위에 장력제어부가 탑재되어 있다. 여기에서 장력을 제어하고 가선을 당기는 장력제어부와 차대를 이동하기 위해서 차륜구동부의 2가지 부분으로 나누어서 간단하게 설명한다.

2.2 장력제어부

그림 2.3은 장력제어부의 기구를 나타내고 장력제어부는 A.C.서보 전동기, 서보 제어기, 볼 감속기, 계기용 증폭기 및 Load cell로 구성되어 있다.

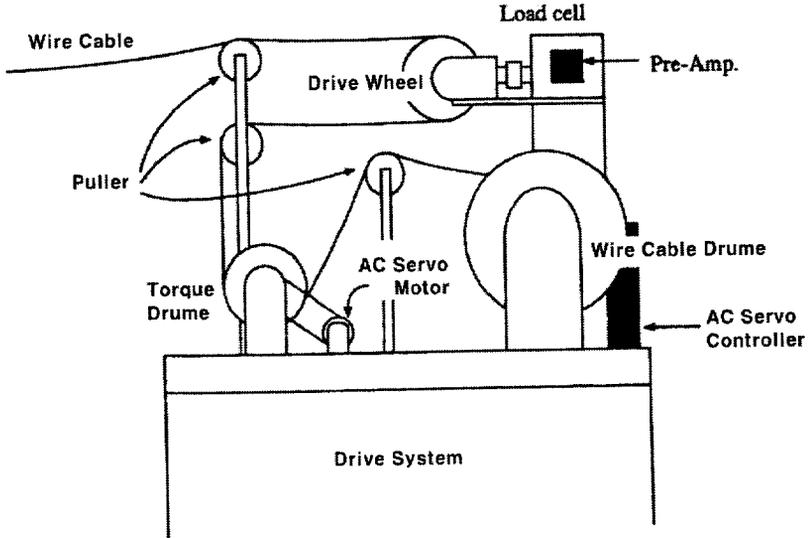


그림 2.3 장력제어부

Load cell(하중 변환기)는 장력 센서이고 외형도는 그림 2.4에 나타낸다. 하중변환기 원리는 브리지 인가전압에는 일정한 전압이 걸려 있다.

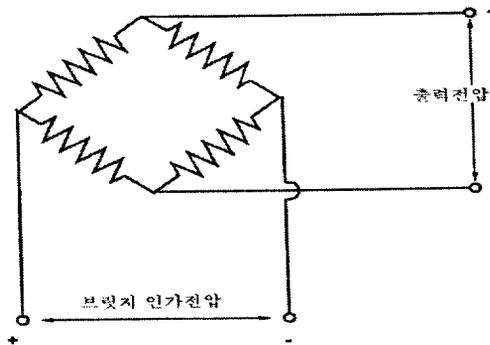


그림 2.4 Load cell 내부회로

그곳에 장력이 더해지면 중앙의 부분이 당겨져서 비틀어지게 되고, 이 비틀어짐에 의해 저항치가 변화하기 때문에 출력전압이 변화한다. 이 출력전압의 값에 의해 어느 정도의 장력이 가해져 있는 것을 알 수 있다.

Load cell에서의 출력전압 **1[kgf]**당 약 **660[μ V]**으로 매우 작기 때문에 프리앰프는 **Load cell**의 출력전압을 증폭하기 위해 사용한다. 여기서 사용한 프리앰프는 인스트루멘테이션 증폭기에 의해 전압을 **1500**배에 증폭할 수 있도록 설계한다. 이와 같이 설계한 것에 의해 장력이 **0~10[kgf]**에 대응해서, 출력전압은 약 **0~10[V]**에 변화시킬 수 있다.

그림 2.5는 장력제어 시스템의 구성을 나타내고 그 과정은 다음과 같다.

가선의 한쪽 끝을 고정시켜 로봇을 움직이면 **Load cell**에 장력을 가하게 되어 **Load cell**에는 장력에 비례한 전압이 출력된다. 이 전압치를 프리앰프에서 증폭되어 **A/D** 컨버터를 통해서 컴퓨터에 입력한다.

다음 이 입력에 따라 컴퓨터에서는 지령치가 디지털 데이터로써 계산되고 컴퓨터에 의해 출력된 디지털 데이터는 **D/A** 컨버터를 통해서 **A.C.** 서보 제어기에 보낸다.

이 데이터에 따라 **A.C.** 서보 제어기는 **A.C.** 서보 전동기를 토크에 제어한다.

결국 **A.C.** 서보 전동기는 토크 제어되면서 회전해 볼 감속기에 의해 회전속도를 $\frac{1}{30}$ 로 떨어뜨려 가선이 당겨진다.

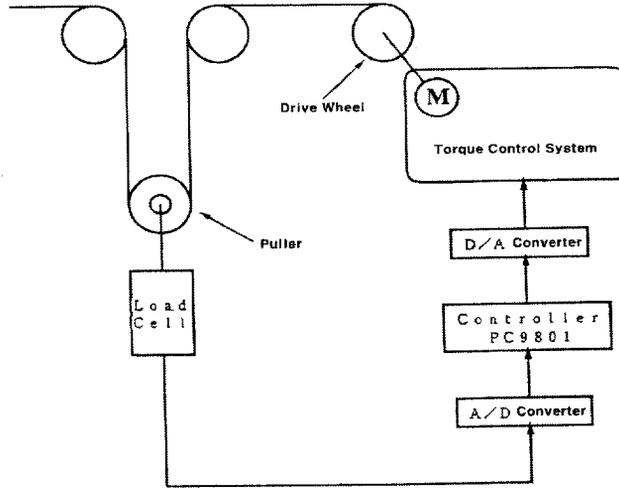


그림 2.5 장력제어 과정

2.3 이동시스템

알루미늄 프레임으로 구성된 높이 약 70[cm]의 차대이고 상부에 장력 제어 작업장치를 탑재할 수 있도록 직경 50[cm] 두께 5[mm]의 알루미늄 원판을 설치한다. 그림 2.6은 이동시스템의 외형도를 나타낸다. 이동시스템인 차대는 이동하기 위한 기구로서 차륜이 붙어 있다. 좌우에 구동륜이 각 1개씩 전후에 방향을 자유로 변하게 할 수 있는 보조륜이 각 1개씩 4개의 차륜이 붙어 있다.

2개의 구동륜을 정회전(CW), 역회전(CCW)시키는 것으로 차대를 전후 좌우, 회전시키는 것이 가능하다. 구동륜은 모터의 회전력에 의해서 회전하지만 구동륜을 직접구동 하기에는 파워가 부족하기 때문에 감속기를 사용하고, 전동기에 직결하고 있다. 또 구동륜과 감속기의 축 위치가 다르므로, 동력 전달장치로서 체인을 사용한다.

차대에는 구동륜을 속도제어 하기 위한 제어장치도 탑재되어 있고, 제

여기에서의 속도 지령에 따라 구동륜을 속도제어 하도록 되어 있다.

로봇은 완전 자립형이고 로봇 상부에 각 전기회로가 탑재되어 있고 각 회로에 전용 CPU에서 전체를 제어하는 멀티프로세스 시스템이다. 로봇 중량은 100[Kg], 최고 속도 1 [m/sec] 최대 가속도 0.5 [m/sec²]이다.

본 연구의 작업모델 로봇은 이동하면서 와이어의 일정 장력을 유지하는 로봇으로 가정하고 이 작업로봇의 시스템 제어에 대해서 설명한다.

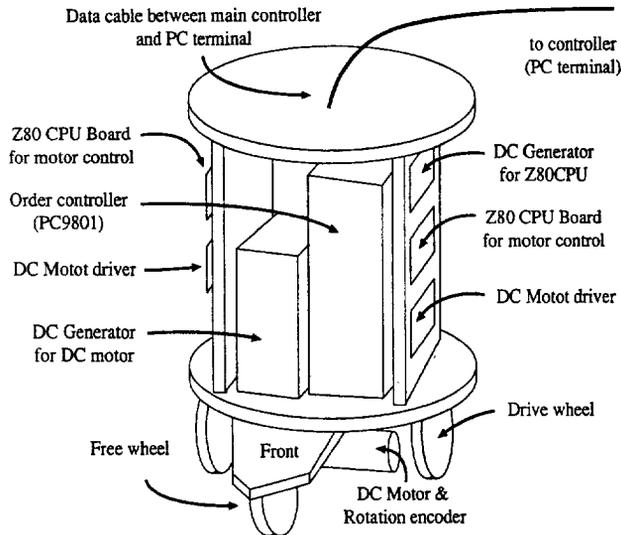


그림 2.6 이동계의 외형도

작성한 로봇의 동작 사양은 2차원의 이동이 가능하고 이동 중에 와이어를 일정 장력(등장력)으로 당기면서 가설하는 작업이동 로봇이다. 실제 산업사회의 응용분야는 전차 트로리의 전력선의 교환 및 광 화이버 케이블의 가설 등에 적합하다. 또 와이어의 가설 높이는 모델로봇의 중심보다도 높으면 불안정 요인을 가지는 것으로 한다.

제 3 장 이동시스템 제어모델

본 장에서는 작업모델 로봇의 이동 동작을 나타낸다. 이동시스템을 모델링하고 D.C. 전동기를 이용한 차륜구동부의 모델과 제어이론에 대해 설명한다.

3.1 작업로봇의 이동시스템

로봇의 이동방법은 차륜을 사용하고, 좌우에 구동륜 2개, 전후에 보조륜 2개, 합이 4륜인 차대 상부에 장력발생 기구를 탑재한다.

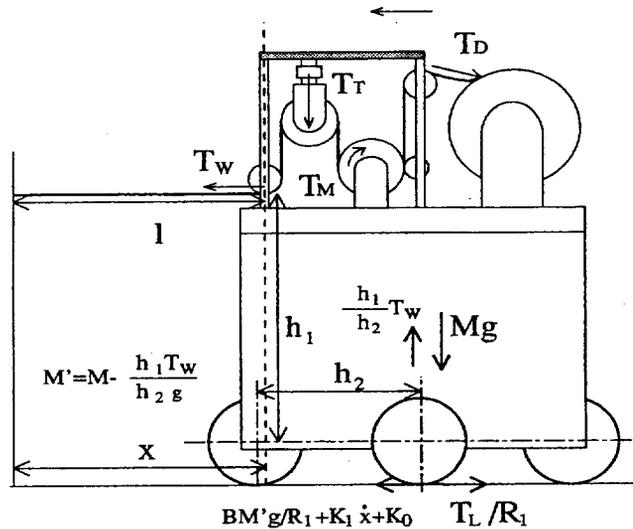


그림 3.1 작업로봇 이동모델

그림 3.1은 이상과 같이 제작한 작업로봇의 모델을 나타내고 작업로봇 모델에 대하여 운동방정식을 나타낸다.

작업모델 로봇의 직선왕복 운동 좌표계에서 구동륜과 지면의 접점에서의 운동방정식을 세우고 우선 힘의 성분을 검토한다. 차륜축에는 구동 전동기

에 의한 힘이 걸려 이것이 진행 방향성분의 힘이다. 그것에 대한 반발력은 구름마찰, 와이어 장력, 전동기 축이나 치차, 힘 전달 체인 등에 생기는 마찰이 있다. 이것의 힘의 합계가 구동륜에 걸리는 힘이 된다.

구르는 마찰은 차대의 무게에 의해 아래 방향으로 작용하는 힘에 비례하지만 아래 방향의 힘은 장력 외란에 의해 어느 정도 그 값이 소멸된다. 소멸된 값은 와이어 인출위치의 바로 밑의 보조륜을 지지점으로 하는 회전운동에 의해 결정된다.

힘 평행 방정식은 식(3.1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_1 = \frac{h_1}{h_2} T_w \quad (3.1)$$

따라서 구르는 마찰에 의한 전동기 토크에 대응하는 반발력은 식(3.2)이 된다.

$$F_2 = \frac{B}{R_1} g \left(M - \frac{h_1}{h_2} \frac{T_w}{g} \right) \quad (3.2)$$

전동기축, 기어, 힘 전달 체인 등에 생기는 마찰은 주로 속도에 비례하는 성분과 정상적으로 존재하는 마찰성분이 있다. 속도에 비례하는 마찰성분의 계수는 K_1 이라 하고, 정상마찰의 계수는 K_0 라고 하면 식(3.3)이 된다.

$$F_3 = K_1 \cdot \dot{x} + K_0 \quad (3.3)$$

모든 파라미터를 고려하여 차대의 이동에 관한 운동 방정식을 세우면 식(3.4), (3.5)와 같이 된다.

$$M\ddot{x} = \frac{T_L}{R_1} - T_w - \frac{Bg}{R_1} \left(M - \frac{h_1}{h_2} \cdot \frac{T_w}{g} \right) - K_0\dot{x} - K_1 \quad (3.4)$$

$$M\ddot{x} < \mu \left(Mg - \frac{h_1}{h_2} \cdot T_w \right) \quad (3.5)$$

여기서,

T_L : 전동기 토크에 반대되는 로봇 시스템의 전동기 부하토크

R_1 : 구동륜의 반경 μ : 상과 차륜간의 정지 마찰계수

T_w : 와이어 장력 B : 구름 마찰계수

g : 중력 가속도 M : 차대 질량

h_1 : 와이어 인출점과 차축과의 높이 방향의 거리

h_2 : 구동륜 축과 보조륜 축의 거리

K_0 : 속도 비례분의 마찰 계수(구동륜축 환산)

K_1 : 정상 마찰계수(구동륜 축 환산)

x : 차대의 와이어 고정 점에서의 거리

여기서 식(3.5)는 차대가 미끄러지지 않기 위한 조건식이다.

그리고 주행용 D.C.전동기에 의한 로봇의 이동거리는 식(3.6)이 된다.

$$x = R_1 \theta_L = R_1 \frac{\theta_M}{n} \quad (3.6)$$

여기서 θ_L : 로봇 회전각 변위, θ_M : 전동기 회전각 변위, n : 치차비

그리고 전동기 토크에 반대 되는 로봇 시스템의 전동기 부하 토크는 식(3.7) 이다.

$$T_L = T \times n + \frac{BMg/2}{n} \quad (3.7)$$

3.2 전동기 속도제어모델

3.2.1 전동기의 모델

직류전동기 회로는 전기자권선의 단자에서 본 인덕턴스 L 을 포함한

그림 3.2와 같이 표현된다.

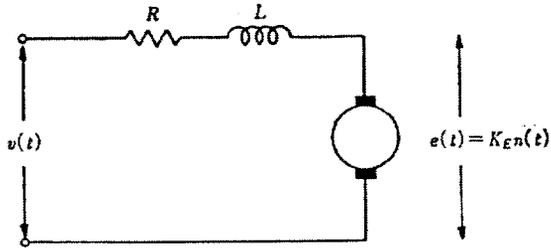


그림 3.2 직류전동기 회로

여기서,

R_a : 전기자 저항

L_a : 전자기 인덕턴스

K_E : 유도기전력 정수

$\omega(t)$: 회전속도

브러시의 전압강하를 무시하면 단자전압과 전류의 관계는 식(3.8)과 같다.

$$v = R_a i + L_a \frac{di}{dt} + K_E \omega \quad (3.8)$$

전동기 발생토크는 식(3.9)과 같다.

$$T_m(t) = K_m \Phi i_a(t) = K_t i_a(t) \quad (3.9)$$

여기서, K_t 는 단위 $[N-m/A]$ 로 나타낸 토크 정수이다. 그리고 토크 $T(t)$ 와 회전속도 $\omega(t)$ 의 관계는 식(3.10)에 나타난다.

$$T(t) = J_M \frac{d\omega}{dt} + D\omega \quad (3.10)$$

여기서,

J_M : 회전자 및 부하의 관성모멘트

D : 전동기 및 부하의 점성 제동계수

($D\omega$ =속도에 비례한 부하 토크)

$\frac{d\omega}{dt}$: 각 가속도

즉, 토크의 일부는 전동기 및 부하를 가속하기 위해 소비되고, 그 외의 일부는 속도에 비례하여 점성부하에 의해 소비된다. 실제, 정지 마찰과 같은 속도에 관계없는 부하도 있지만, 정수항에 포함되어 있기 때문에 식(3.10)에는 포함되어 있지 않다.

식(3.8)을 라플라스 변환하면 식(3.11) 이 된다.

$$V(s) - K_E \Omega(s) = (R_a + sL_a)I(s) \quad (3.11)$$

식(3.11)에서 전류의 라플라스 변환 $I(s)$ 은

$$I(s) = \frac{V(s) - K_E \Omega(s)}{sL_a + R_a} \quad (3.12)$$

이 되고 이 관계를 블록선도에 나타내면 그림 3.3과 같이 된다.

한편, 식(3.9), (3.10)을 라플라스 변환하면 식(3.13), (3.14)과 같다.

$$T(s) = K_T I(s) \quad (3.13)$$

$$T(s) = (sJ_M + D)\Omega(s) \quad (3.14)$$

이 식(3.13), (3.14)은 그림 3.4의 블록선도에 의해 나타난다.

여기서, 일반적으로 도통시 브러시와 정류자 사이의 마찰은 작기 때문에 전동기 자신의 점성 제동계수 D 는 무시한다. 즉 $D=0$ 로 한다.

이와 같이해서 얻은 2가지의 블록선도를 조합하고 전류 피드백 및 증폭기를 포함시키면 그림 3.5가 된다. 실제 운전에서는 전동기에 증폭기를 접속하여 전동기 단자에 전압을 인가하고 전기자에 전류를 흐르게 되어 구동한다.

전동기를 사용한 목적은 발생 토오크를 정밀하게 가변하는 것으로, 증폭기에 전해진 전압 V_i 에 비례해서 전기자 전류 I_a 가 흐르게 하는 것이 가장 좋다. 이 때문에 그림 3.5 블록선도에 나타난 것과 같이 전기자 전류를 검출해서 증폭기에 피드백을 시킨다. 이와 같은 증폭기를 전류증폭기라고 부른다.

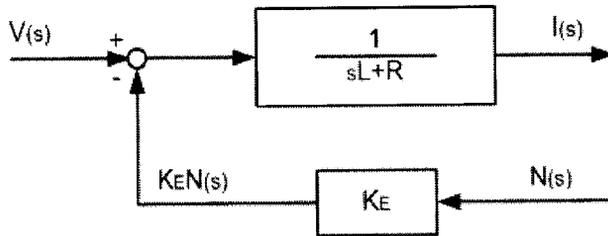


그림 3.3 전기적관계 블록선도

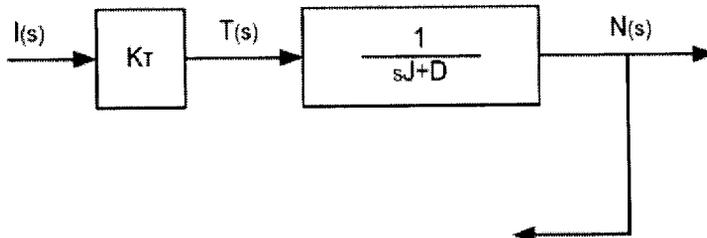


그림 3.4 기계적관계 블록선도

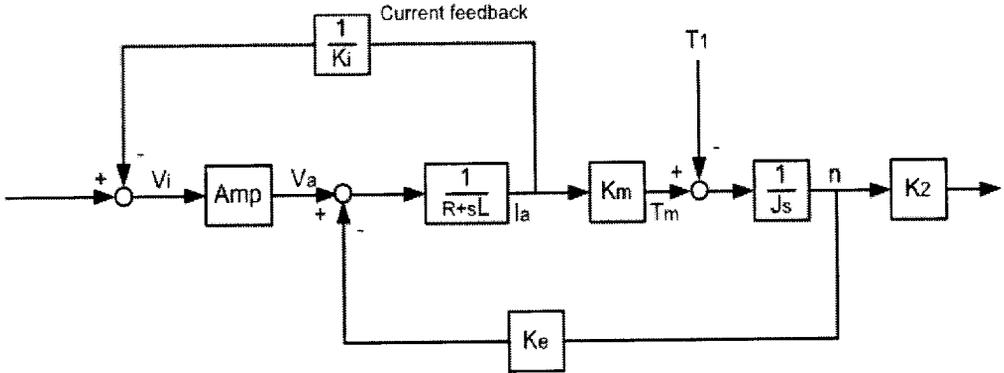


그림 3.5 직류전동기 블록선도

여기서,

K_T : 토오크 정수 (K_m) Amp : 전류 증폭기 이득

K_2 : 전동기 축의 속도를 차륜의 속도에 변환하는 정수

(감속비 n 과 동일하다)

$1/K_i$: 전류 피드백 정수

피드백 전류가 $1/K_i$ 로 되어있는 이유는 전류앰프의 이득을 매우 크게 하는 것에 의해 전동기의 전압 입력부분이 $I_a = K_i V_i$ 와 비슷하게 되고, 증폭기에 가해진 전압의 K_i 배에 비례한 전기자 전류를 흐리게 하기 때문이다.

3.2.2 전류제어

전동기를 제어할 경우, 전동기 자신의 속응성과 정상특성을 개선하는 방법을 생각한다. 전동기는 코일과 저항의 직렬접속에 의한 1차지연계이기 때문에 피드백에 의해 속응성을 개선할 수 있다고 생각되므로 전류피드백을

한다. 전류피드백의 방법은 전동기전류를 전류검출기로 검출하여 행한다. 그리고 그 값의 $1/K_1$ 배의 계수기로 전동기 입력전압에서 뺀다. 이 편차를 앰프(Gain = Amp)로 증폭하고 전동기 입력전압으로 한다.

전동기 속도는 전류증폭에 의한 전기자 전류값에 상응하는 전압 지령을 가하는 것에 의해 속도가 제어되는 것을 알 수 있지만 이것만으로 전동기가 희망하는 속도가 제어되지 않는다. 여기서 희망한 속도에 잘 제어하게 하기 위해서 다음과 같은 블록선도를 생각할 수 있다.

먼저, 전동기의 속도를 수동으로 지령속도를 주는 것을 생각해 본다. 그때, 전동기의 검출 속도가 목표값(희망하는 값)보다 빠르면 감속시키기 위해 감속시키는 방향으로 힘을 내는 전류 지령을 전류증폭기에 주고, 늦으면 역으로 가속하는 지령을 주면된다. 이것이 피드백 제어의 원리이다.

이러한 생각에서 그림 3.5에 속도 피드백을 하는 것이지만 전동기에서 피드백 된 값은 펄스 인코드에 의해 얻을 수 있는 값이기 때문에 단지 피드백 된 것이 아니고 이 값을 차륜의 회전속도로 변환하지 않으면 안된다.

그 때문에 피드백의 도중에 비례정수 K_c 을 넣는다. (시뮬레이션 할 때에는 K_c 는 K_2 와 같은 값으로 한다.) 또한 단위를 일치시키고 응답 속도를 빠르게 하기 위해 속도제어용 증폭기 K_1 를 넣는다. 그림 3.6은 이상의 것을 전부 고려해서 작성한 속도제어 블록선도를 나타낸다.

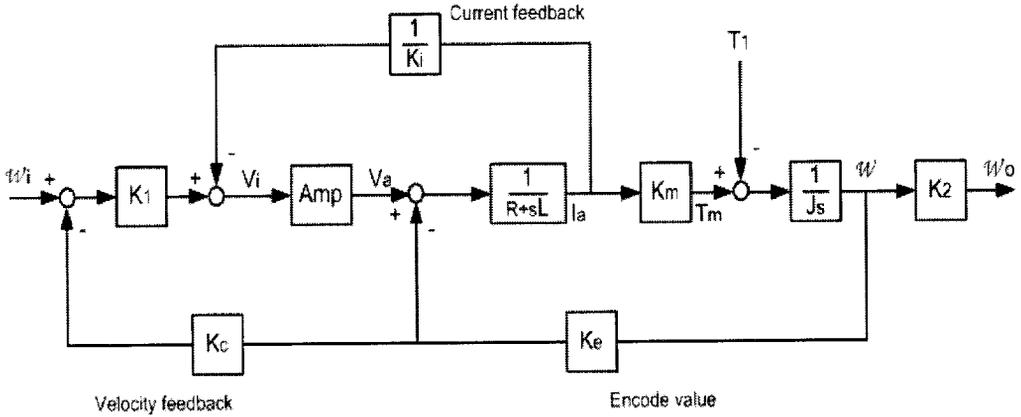


그림 3.6 속도제어계 기본 구성

여기서 시정수를 개선하기 위해서는 K_i 을 0.5정도의 값으로 했을 때, Amp가 가능한 크게 하는 것이 좋은 것을 알 수 있다. 또 이렇게 하면 전기적 시정수가 개선되지만 전체 이득이 작아지기 때문에 기계적 시정수가 증가한다. 그러나 다음에서 설명하는 것과 같은 속도제어를 행하기 때문에 기계적 시정수는 개선 가능하므로 문제는 없다.

3.3 속도제어

그림 3.6에 나타난 블록선도의 동작의 개요를 간단하게 설명한다. 초기에 전동기는 정지상태 즉 $\omega_0 = 0$ 라고 한다.

정의 값의 속도지령 ω_i 를 주면 ω_i 에서 출력회전수 ω_0 를 뺀 값 편차 $\Delta\omega$ 는 어느 정의 값이 된다.

이 경우 속도편차 $\Delta\omega$ 를 비례정수 K_1 에서 전압값으로 바꿔 (이외에 정상편차를 적게 하거나 응답시간을 빨리하거나 한다.) 이 값과 $1/K_i$ 에서 얻은 값의 차가 증폭기(Amp)에 가해지게 된다.

그래서 그 출력이 전기자 전압으로써 전동기에 인가된다.

그러나 전동기내부에 유도기전력에 의해 전압강하가 생기기 때문에 전동기에 흐르는 전기자 전류는 전기자 전압에서 유기기전력 분을 뺀 전압분만 흐린다.

그래서 전기자 전류에 의해 정의 토오크 T_m 가 발생하여 축이 가속되어 속도가 증가한다. 속도가 상승하게 됨에 따라 편차 $\Delta\omega$ 는 영(0)에 가깝게 된다.

이 때문에 토오크 T_m 도 감소하고 축의 가속도 약하게 된다. 전동기의 속도가 지령속도에 일치하면 토오크 T_m 가 영으로 되고 가속되지 않는다. 외란 T_L 가 영이면 이 상태의 속도로 회전을 계속하게 된다. 즉 전동기의 속도가 희망되는 값으로 제어되게 된다.

그러나 실제에는 외란 토오크 T_L 는 영이 아니다. 그림 4.7에서 속도 ω_0 을 일정 값에 유지하기 위해서는 외란 토오크 T_L 에 대응되도록 전동기 토오크 T_m 가 항상 발생하지 않으면 안된다.

그러나 이 블록선도에는 $\omega_i = \omega_0$ 일 때 반드시 $T_m = 0$ 이 된다. 이 때문에 편차 $\Delta\omega$ 를 제로로 하지 못하고 정상편차가 생기게 된다.

여기서 $\Delta\omega = 0$ 이 되어도 토오크가 발생되도록 T_L 에 상당하는 값을 어디에 기억해 두면 된다. 이 때문에 적분요소가 필요하게 된다. 속도를 적분하는 것은 각 변위에 상당하는 것으로 정상편차가 없이 제어 할 수 있다.

그 때문에 그림 3.6의 K_1 라고 하는 블록을 K_1 에서 $K_1(1+1/T_i s)$ 으로 변경함으로써 외란에 의한 정상편차의 발생을 없애는 것이 가능하다.

이상의 고찰에서 그림 3.6의 블록선도는 최종적으로 그림 3.7과 같이 개선한 속도제어 블록선도가 된다.

그림 3.8은 그림 3.7을 간략화 하여 완성한 차륜구동부의 블록선도를 나타낸다.

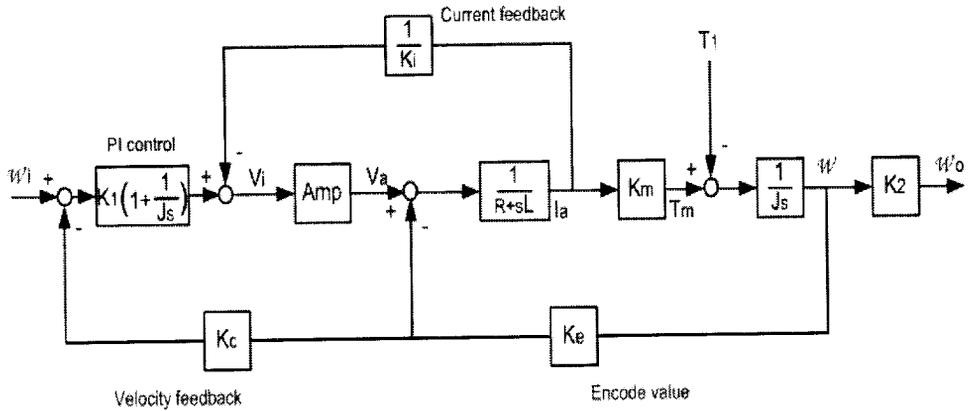


그림 3.7 제안한 속도제어 블록선도

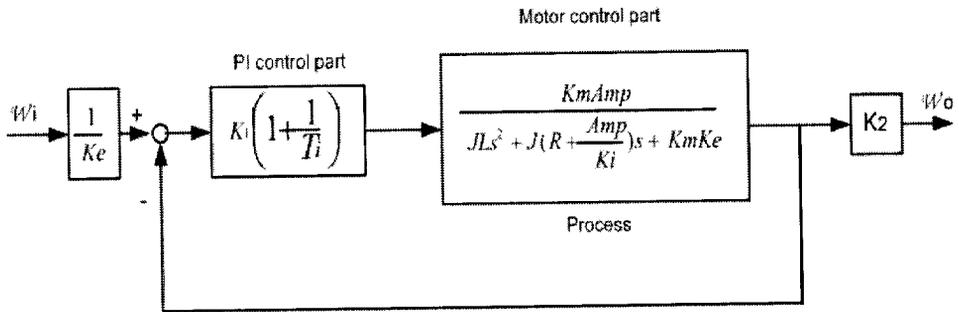


그림 3.8 차륜구동부 블록선도

이상 구성한 작업모델 로봇의 이동거리 (위치)를 제어는 전동기 속도를 제어하여 로봇의 기동 정지를 제어하고 목적의 이동을 얻는다.

여기서 속도는 피드백 보상을 행하고 PI보상은 직렬보상을 한다. 또한 속

도 외란에 의한 영향을 억제하고 목적거리에 이동하기 위해서 적분특성을 가질 필요가 있다. 외란 응답의 개선에는 비례보상 하고 적분특성의 개선에는 적분보상을 한다. 이상을 고려하여 피드백형 보상을 한다. 여기서 구성한 속도제어부는 감속기어 및 타이밍 벨트를 포함한 속도제어 블록선도 이다.

이 속도제어의 블록선도에서 전동기 입력전압은 식(3.15)과 같이 제어한다.

$$v_a(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i \cdot s}\right) (V^*(s) - V_{enco}(s)) \quad (3.15)$$

여기서,

$v_a(s)$: 전동기 입력전압

K_p : 비례상수

V^*_{order} : 속도 지령치

T_i : 적분 상수

$V_{encoder}$: 실제속도

그림 3.8의 블록선도에서 전동기 부의 전달함수를 구하면 식(3.16)이 된다.

$$G_M(s) = \frac{\frac{A_m}{R_a + sL_a}}{1 + \frac{A_m}{R_a + sL_a} \frac{1}{K_i}} = \frac{1}{\frac{R_a}{A_m} + \frac{1}{K_i} + s \frac{L_a}{A_m}} \quad (3.16)$$

기계부분을 포함한 플랜트(프로세스)의 전달함수는 식(3.17)이 된다.

$$G_P(s) = \frac{A_m K_T}{JL_a s^2 + J(R_a + \frac{A_m}{K_i})s + K_T K_E} \quad (3.17)$$

3.4 이동과 장력의 비간섭화

여기까지는 이동과 장력에 대해서 독립적으로 생각해 왔지만 여기서는 이것을 조합해서 동시에 제어하는 것을 생각한다. 우선 개별로 도출한 운동 방정식을 전체의 운동 방정식에 다시 사용하기로 한다. 이것은 전체를 하나의 것으로 해서 제어하기 때문이다.

이미 이동계 단독 운동 방정식은 수립되어 있기 때문에 여기에 외부에서의 영향도 운동 방정식에 첨가하는 것이 가능하다. 식에 나타나는 것이 가능하다면 당연히 계산에 의해 예측하고 특성을 개선하는 것이 가능하다.

그림 3.9은 장력과 이동의 2가지 제어를 나타내고 두 시스템을 식으로 나타내는 것이 가능하다면 마치 단독으로 동작하고 있는 것과 같이 제어하는 것이 가능하다. 아울러 서로 비간섭한 제어기구로 하는 것이 가능한 셈이다. 그리고 이 비간섭화를 위해서 채택한 제어방식이 피드포워드형 2자유도 제어이다.

간섭하고 외란을 표현하는 운동 방정식의 해석은 이미 구하였기 때문에 피드포워드 할 량에 대해서 검토한다.

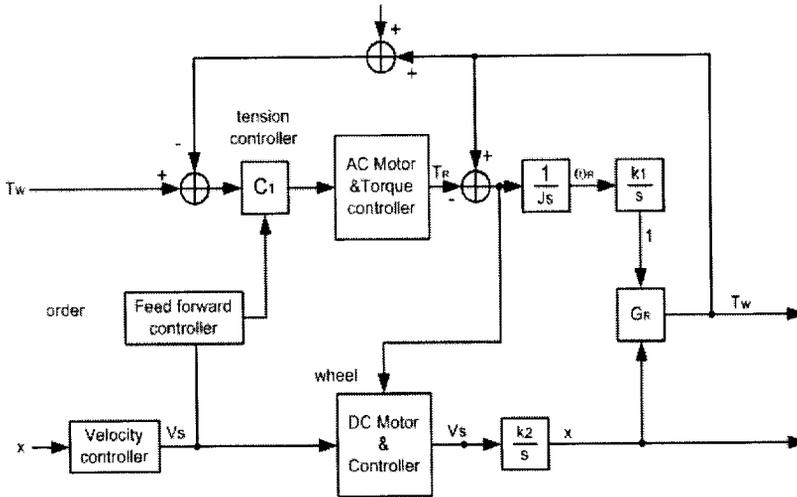


그림 3.9 비간섭 속도제어부 블록선도

여기서,

T_w : 와이어 장력

x : 차대의 와이어 고정점에서의 거리

l : 와이어 인출 길이

E : 와이어 영률

S : 와이어 단면적

(1) 장력계에서 이동계로의 영향

장력계는 장력을 일정하게 하는 것이 목적이기 때문에 크게 보면 이동계로의 영향 즉, 이동계 외에서의 외란은 일정한 값이다. 따라서 전동기 전류에 피드포워드 한 만큼 특성이 좋다. (이번 이동계는 속도제어기의 적분기에 의해 보상할 수 있는 범위이기 때문에 이동계로의 피드포워드는 행하지 않았다.)

(2) 이동계에서 장력계로의 영향

장력계는 와이어의 장력을 일정하게 유지하는 것이므로 장력은 와이어의 기본 길이와 와이어의 신장을 포함한 실장에 의해 크게 변화한다. 구동 활차의 토오크(장력)는 실제 가설 와이어의 길이 변화, 차대의 가속도 만큼 보상해 주어야 된다.

따라서 구동 활차의 토오크에 피드포워드 할량은 차대의 가속도에 지령장력에 관한 이득계수를 곱하는 것이 좋은 것을 알 수 있다. 또, 차대가 정지상태의 경우와 주행상태의 경우는 구동 활차의 힘의 방향은 정반대이기 때문에 차대의 시동 시에는 이동계에서 장력계로의 영향이 특히 크다.

이상의 검토를 바탕으로 이동계에서 장력계로의 영향이 비간섭화 되도록 제어계를 구성한다. 그러나 이 문제는 본 연구에서는 하지 않는다.

제 4 장 이동시스템의 설계

본 장에서는 작업모델 로봇의 이동시스템을 설계하고 PWM 제어시에 각 파라미터를 결정하여 제작한다.

4.1 로봇 이동시스템

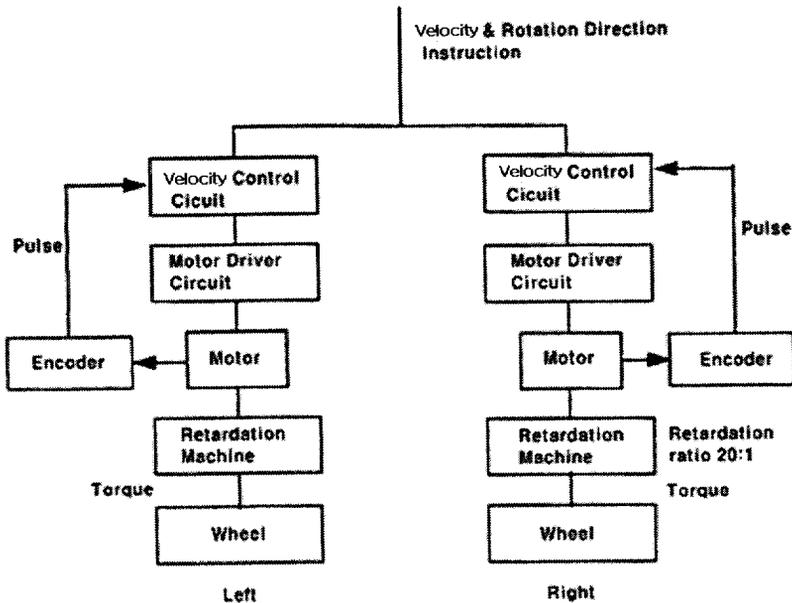


그림 4.1 이동시스템의 구성

그림 4.1은 차륜구동부 각 요소의 기능을 블록으로 표시하고 신호전달의 방향을 화살표로 표시한 것이다. 이것에 의해 차륜이 구동 될 때까지 신호 전달의 모양을 이해할 수 있다.

그림 4.1에 나타난 이동시스템은 지령부에서 속도지령치가 전달되어 오면, 속도제어회로에 지령치와 인코드의 피드백 값에서 전동기 구동회

로에 전달될 PWM지령치를 계산하고 PWM파형이 전동기 구동 회로에 출력한다. 전동기에 발생한 토오크는 20:1의 볼 감속기 및 타이밍 벨트를 통해서 구동륜에 전달된다. 전동기에는 회전각(각속도)을 인코드에서 검출하고 이것을 카운터회로에서 카운터 하여 속도제어계에 피드백 된다.

로봇 이동은 전동기 속도제어에 의해서 로봇의 진행되는 속도를 조절하게 된다. 즉, 차륜은 전동기의 회전을 제어하여 진행되는 속도를 조절하는 것이 된다. 이를 위해 응답성, 제어성에 뛰어나고 현재까지 넓게 사용되는 D.C.서보전동기를 사용한다.

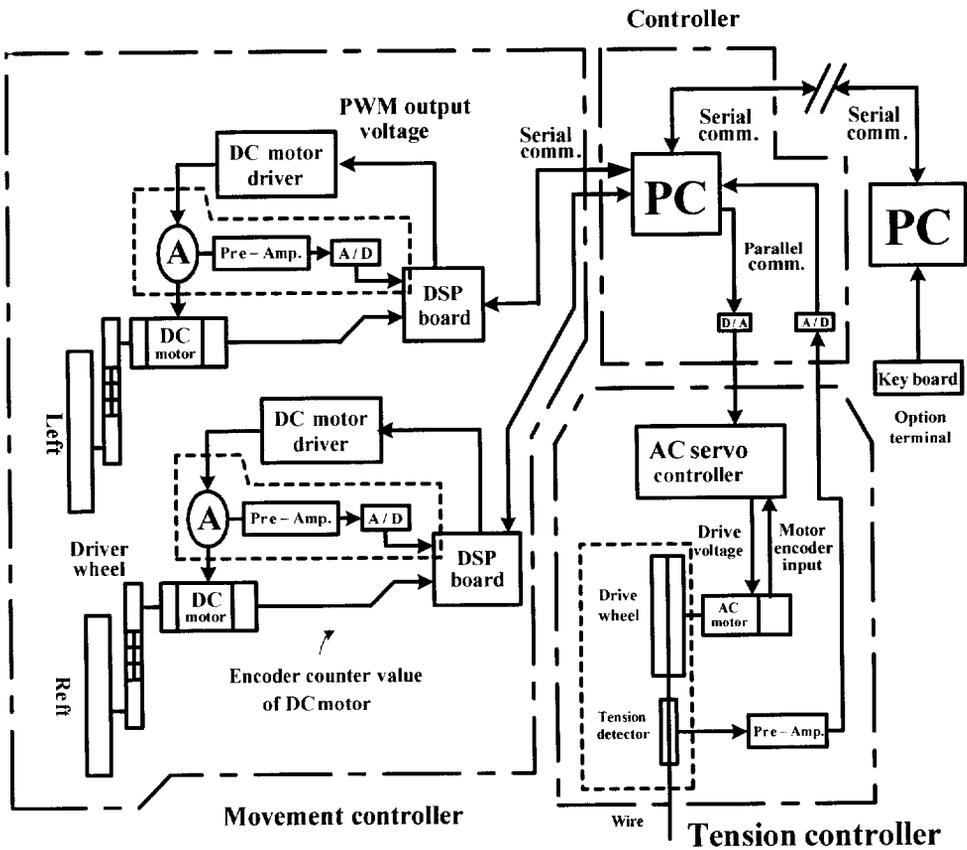


그림 4.2 회로구성

그림 4.2는 이동시스템의 회로구성을 나타낸 것이다. 로봇 이동시스템은 PC 98001의 CPU, PWM발생회로, 인터럽트 펄스 발생회로, 카운터회로, H형 구동회로, 전원 및 I/O 포트로 구성한다.

서보계를 구성 할 때 기본 사양은 목표치를 변화시킬 때 실제의 전동기 출력이 빨리 응답할 것, 응답의 진동현상등 불안전현상이 일어나지 않을 것, 정상 편차가 없을 것(적을 것)등으로 한다.

서보계를 실제로 구성하는 방법으로써 센서 회로의 출력을 디지털화해서 컴퓨터에 입력하고 그림 4.3의 비교부와 제어부를 소프트웨어화해 컴퓨터에서 프로그램으로 서보제어 시킬 수 있게 된다. 이 방법을 소프트웨어 서보계라고 한다.

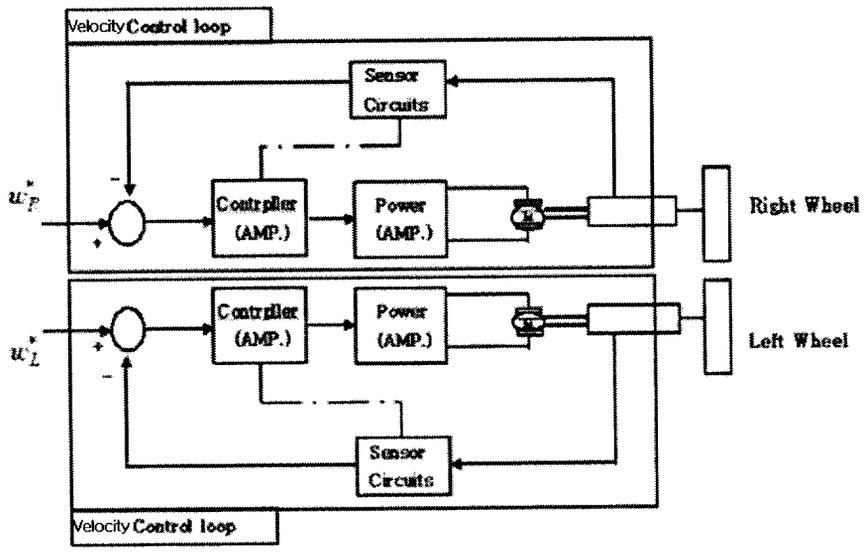


그림 4.3 이동로봇의 좌우 동륜의 속도 서보계

소프트웨어 서보를 이용하여 이동로봇의 동륜 제어계 구성은 그림 4.3

의 파선에 둘러싸인 부분을 나타낸다. 이 경우 센서 회로 및 제어장치에는 A/D 컨버터, D/A 컨버터 또는 그것에 대응하는 기능을 가질 필요가 있다.

소프트웨어 서보에서 전동기를 제어하는 경우 소프트웨어는 일정 혹은 가변이 적은 시간 간격마다 센서 회로에서 속도를 읽어 전동기에 전달되는 제어량을 계산해서 파워 증폭으로 출력치를 결정한다. 이 시간 간격을 샘플링 주기라 하고 일반적으로 10~30[ms]를 취한다.

소프트웨어 서보제어의 이점은 특수한 장치가 필요 없게 되고, 제어계의 하드웨어가 간단화 하게 된다. 그리고 좌우의 차륜은 협조하게 되는 등의 복잡한 제어의 실현이 가능하게 된다.

그림 4.3은 좌우 동륜을 갖는 이동로봇의 속도제어 서보계를 나타낸다. 이동로봇은 직진하기 위해서는 좌우의 동륜을 협조시키는 것이 필요로 하고 만약 한쪽이 늦어지게 되면 다른 한쪽의 속도도 늦추는 등의 제어가 필요가 있다. 따라서 이동로봇의 두개의 동륜 구동용 전동기를 제어하기 위해 서보계는 그림 4.3과 같은 구조로 되어 있고 아날로그 회로를 사용해서 구성된다. 이 경우 목표 속도는 아날로그 전압으로 주어지고 이것은 센서 회로에서 얻어진 현재 속도에 비례한 전압과 비교해서 차 전압이 증폭되어 전동기에 공급된다. 따라서 마이크로컴퓨터의 제어로 이 서보계를 움직이기 위해서는 필요한 곳에 A/D 컨버터, D/A 컨버터를 두고 전동기와 제어신호를 수수하게 한다.

4.2 이동 방식

로봇 다리의 모양은 철도 레일 위, 건물 바닥 면, 통로 등을 이동하기 편리하도록 최대한 간단해야 한다. 따라서 본 로봇은 2개의 구동륜과 2

개의 보조륜으로 구성한다. 조타 방식은 PWS(Power Wheeled Steering)으로 2개의 독립된 구동륜을 표 1에 나타낸 방향으로 회전시킴으로서 직진, 후진, 좌우 회전할 수 있다.

표 1 Power Wheeled Steering 방식

	좌 구동륜	우 구동륜
직진	F	F
후진	B	B
좌 회전	B	F
우 회전	F	B

4.3 H형 전동기 구동회로

D.C. 전동기를 단일 전원으로 정회전, 역회전 시키는 구동회로로서 이용하는 것이 H형 구동회로이다. 그림 4.4는 전동기의 전류를 스위칭 하는 H형 구동회로 이고 이 회로는 트랜지스터를 표 2에 의해 제어입력을 PWM에 의해 스위칭 한다.

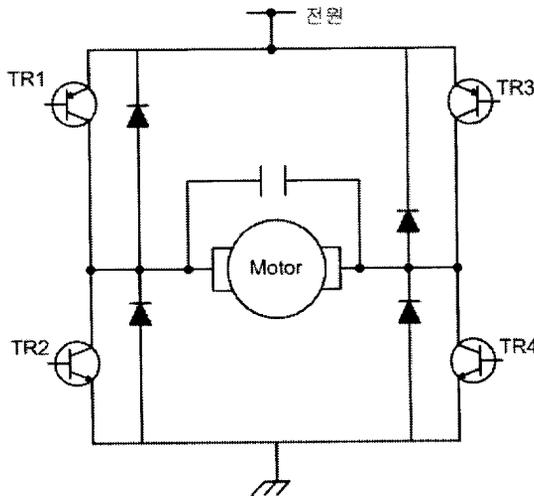


그림 4.4 H형 트랜지스터 전동기구동회로

표 2 스위치에 의한 전동기 제어

제어 입력		트랜지스터 스위치				전 동 기	
PWM	회전방향	TR1	TR2	TR3	TR4	단 자	동 작
0		off	off	off	off	개 방	관성회전
1	1	on	off	off	on	+전압인가	정 방향 토크발생
1	0	off	on	on	off	-전압인가	역 방향 토크발생
		off	on	off	on	단 락	브레이크 토크발생
		on	off	on	off		

스위칭 동작은 TR1과 TR4가 on 되고 TR2, TR3가 off 될 때를 전동기가 정회전 하려면 TR2와 TR3가 on, TR1과 TR4가 off 될 때는 역회전하게 된다.

다음 TR2, TR4가 동시에 on 될 때는 전동기 양단자가 단락되어 제동으로 동작한다. 또한 모든 TR를 off 하면 단자 사이가 개방되어 관성에 의해서 회전하게 된다. 다이오드는 TR가 off 될 때 전동기의 인덕턴스 L에 의해서 생기는 위상지연 전류를 없애도록 하고 있다.

이 회로에서 주의 할 것은 TR1과 TR2가 동시에 on 되거나 TR3과 TR4가 동시에 on 상태가 생기면 TR에 큰 전류가 흐르게 되고 소손되게 된다. 이것을 방지하기 위해서는 동시에 on 이 되지 않도록 하드웨어적 논리를 조합하고 TR와 TR 사이에 저항을 삽입하여 전류 제한을 행하는 방법을 생각할 수 있다.

또한 전동기를 마이크로프로세서로서 제어하는 경우 하드웨어적으로 고려해야 될 문제점은 마이크로프로세서 및 디지털 회로가 일반적으로 5[V], 10[mA] 정도에서 동작하는 것에 대하여 전동기는 수십[V], 10[A]

에서 동작하는 점이다. 어떤 원인으로 마이크로프로세서나 디지털 회로가 소손되는 것을 방지하기 위해서는 구동회로와 디지털 회로를 전기적으로 절연시키는 방법이 강구되어야 한다.

따라서, 본 장치는 포토 카플러를 이용하여 전기적으로 절연하는 방법을 사용하였고 그림 4.5는 그 회로를 나타낸다.

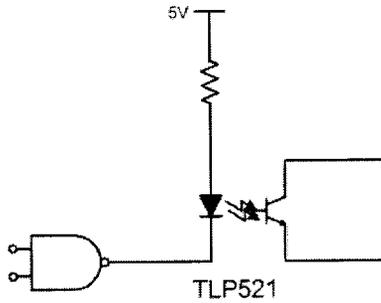


그림 4.5 포토 카플러

이 경우 발광 다이오드의 8[mA]를 흘리기 위해서 575[Ω] 저항을 접속한다. 전류 전달율은 TLP521의 경우 50~60%가 되기 때문에 최저 50%로 되면 I_0 는 4[mA]가 된다.

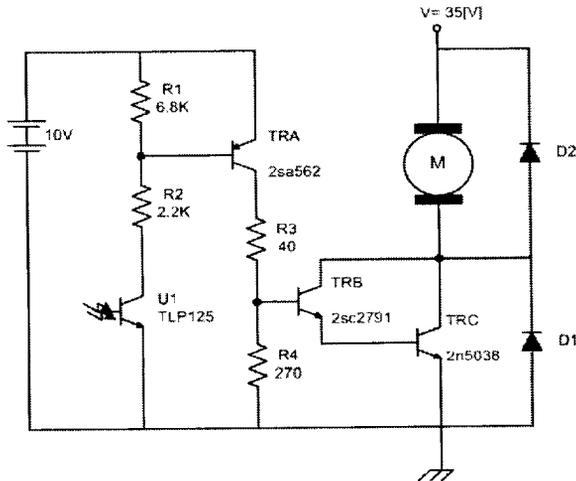


그림 4.6 기본 증폭 회로

이것을 앞단의 트랜지스터에 흘려서 최대 전류가 약 20[A]로 증폭한다. 그림 4.6은 제어신호에 의해 전달된 전류신호를 증폭하는 기본 증폭회로이다.

그림에서 포토 카플러 TLP521이 on 되면 TRA가 on 되고 TRA의 에미트에서 콜렉터로 흐르는 전류는 TRB, TRC를 on 시킨다. 다음 R2, R3는 전류 제한용이고 R1, R4는 안정화용이다.

제일 끝단의 2n5038은 20[A]가 흐르게 하면 되지 않는다.

2n5038 $h_{fe}=20$, 2sc2791의 h_{fe} 는 10이기 때문에 2sc2791의 베이스 전류는 $20/(20 \times 10)=100[\text{mA}]$ 이상으로 되지 않으면 되지 않는다.

TRA, TRB, TRC가 on 될 때, TRB의 베이스 전압은 약 1.6[V]가 되고 TRA의 V_{ce} 는 약 0.2[V]이기 때문에 R3에 걸리는 전압은 $10 - 1.6 - 0.2 = 8.2[\text{V}]$ 로 된다.

여기서, $R3=40[\Omega]$ 으로 하면 R3에 흐르는 전류는 $8.2/40=200[\text{mA}]$ 로 되어 1.6[V]사이에 $R4=270[\Omega]$ 을 삽입하면은 2sc2791의 베이스에 흐르는 전류는 $200 - 1.6 \times 10^3 / 270 = 194[\text{mA}]$ 로 된다. 한편, 2sa562의 h_{fe} 는 70 내지 240이기 때문에 $h_{fe}=100$ 으로 하여 베이스에 1[mA]를 흘리는 것이 된다.

TRA가 on될 때 $V_{be}=0.7[\text{V}]$, TLP521의 $V_{be}=0.3[\text{V}]$ 로 되고 R2에 흐르는 전류는 $(10 - 0.7 - 0.3) \times 10^3 / 2.2 \times 10^3 = 4.1[\text{mA}]$ 로 된다.

처음의 포토 카플러의 트랜지스터의 4[mA]가 흐르는 것으로 설정한 것과 일치된다. R3의 발열은 $P_{R3} \approx 8.2[\text{V}] \times 200[\text{mA}] \approx 1.6[\text{W}]$ 이므로 3[W]의 저항을 선택하면 된다.

그림 4.7은 이상의 설계원리에 대해서 설계한 H형 구동회로를 나타낸다.

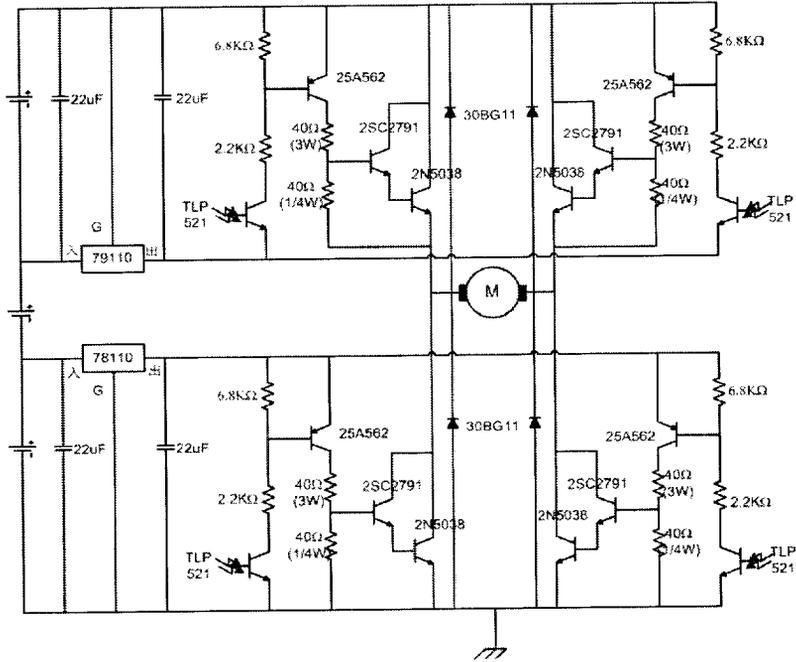


그림 4.7 설계한 H형 구동회로

4.4 속도검출

속도, 위치 제어를 행할 때 전동기의 회전각도, 회전 각속도를 검출할 필요가 있고 그 역할을 하는 것이 로터리 인코더이다. 사용된 인코드는 전동기가 일정 회전하기 위해서 한가지의 펄스를 발생하는 회전형이고 증분 부호기 타입이다.

이 타입은 절대 각도를 직접 검출하지 않지만 이동각도의 증가, 감소를 검출하는 것이 가능한 특징이 있다. 또, 구조가 간단하기 때문에 널리 사용되고 있다. 더욱더 회전형 인코드는 처음부터 디지털 레벨의 신호가 얻을 수 있으므로 A/D 컨버터가 필요가 없고, 마이크로컴퓨터를 사용해서 소프트웨어적으로 서보계를 구성하기에 편리하다.

이 회전형 인코더는 일반적으로 원판에 슬롯을 만들어 포토 인터럽트에 의해 슬롯에 광의 통과를 검출한다. 90° 위상의 2개소의 위치에 포토 인터럽트 배치하고 2개의 포토 인터럽트의 위상 관계에서 전동기의 회전방향도 검출할 수 있다.

또, 포토 인터럽트에 발생한 펄스를 회전방향에 포함한 업/다운 카운트로 계수하면 전동기 회전각도의 누적치 즉, 현재의 각도 위치를 구할 수 있다.

회전형 인코더에 발생한 펄스에서 속도를 구하는 방법은 일정 간격 사이에 있는 펄스 수를 계산하는 방법과 펄스열의 펄스 간격을 구한 속도의 역수로서 계산하는 방법이 있다. 속도가 빠를 때는 전자의 방법이 정도가 좋고, 회전속도가 늦을 때는 후자의 쪽이 정도가 좋다.

본 연구에서 사용한 인코더는 D.C.서보전동기의 직결되어 있고 1회전당 500펄스의 클럭 펄스를 발생한다. 출력단자는 3채널이고 그 중에 2채널은 서로 위상이 약 90도이기 때문에 각각 **Lead, Lag**라 부른다. 이 두 채널의 펄스를 변경하여 사용함으로써 회전방향을 검출할 수 있다.

이 인코더의 펄스 구동회로 중에 있는 16비트 카운터에서 펄스의 엣지를 검출하고, 전동기 축 1회전에 대해 2000펄스 카운터 한다.

회전방향 검지의 경우 카운터는 업 카운터로써 동작하고, 역방향의 경우 카운트는 다운 카운터로써 동작한다. 이 카운터에 의해 카운터 값이 2의 보수 표현으로 정회전, 역회전이 검출된다. 그 데이터를 속도제어용 마이크로컴퓨터 제어에 피드백 하여 D.C.모터의 속도제어가 행하여진다.

4.5 제어회로

4.5.1 PWM 발생회로

앞에서 기술한 기준펄스의 주파수는 될 수 있는 한 고주파가 되어야 아날로그 제어의 근접되어 원활한 회전을 시킬 수 있지만 트랜지스터 등 스위칭 소자의 응답에 한계가 있으므로 본 시스템에서는 기준 펄스 주파수를 520[Hz]로 한다.

그림 4.8은 실제 PWM발생 회로를 나타낸다. 이 회로는 TTL와 4[MHz] 수정 발진자에서 4[MHz]를 발전시켜 이것을 LS490을 2개 사용하여 1/1000분주한 4[KHz]의 출력을 기준펄스로 한다.

다음 PWM데이터는 4bit로 하여 범용 I/O포트 8255의 B포트에서 데이터를 출력한다. 또한 전동기의 정회전, 역회전, 제동, 관성 운전시킴기 때문에 4개 신호를 동일한 B포트의 2bit(PB4, PB5)에서 출력한다.

표 3은 전동기 회전방향을 나타낸 것이다.

표 3 전동기 회전방향

상 태	PB5	PB4	on Tr
정 회 전	L	H	1,4
역 회 전	H	L	2,3
제 동	H	H	2,4
관성운전	L	L	

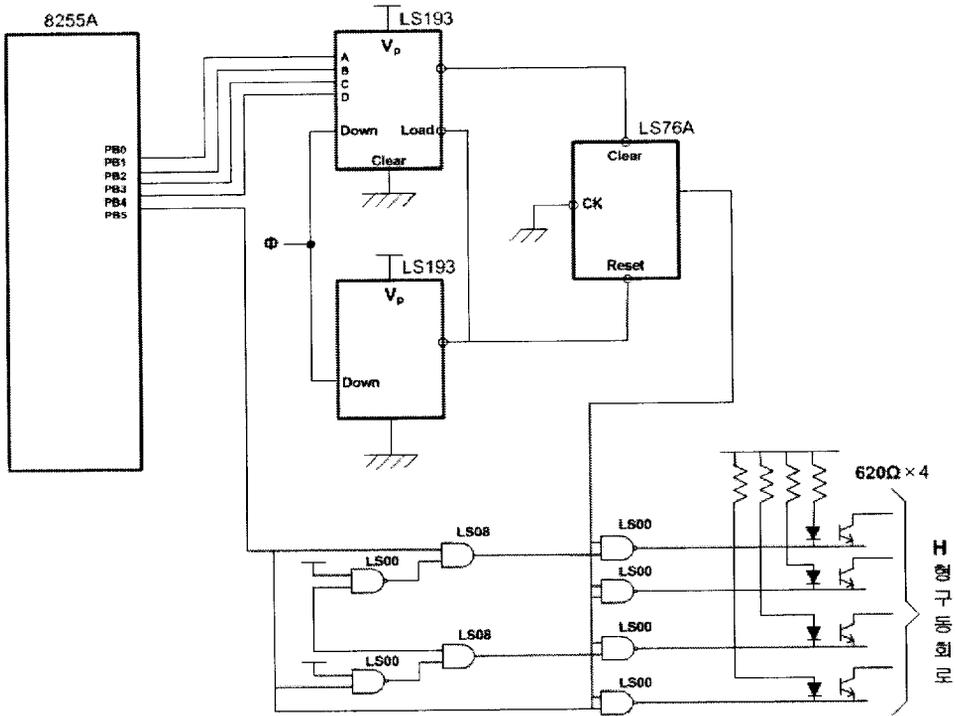


그림 4.8 PWM 발생회로

4.5.2 인터럽트 펄스 발생회로

4[KHz]의 PWM기준펄스에서 이용한 TTL수정발진회로를 이용하여 25[Hz](40[ms])의 인터럽트 펄스를 만든다. 이때, CPU의 INT단자에 인터럽트를 걸고 펄스의 폭을 100[μ s]정도로 되도록 단안정 멀티바이브레이터 7421을 이용한다.

이 펄스폭은 외부저항 및 콘덴서의 크기로 결정한다. 본 시스템에서는 10[K Ω]과 0.01[μ F]를 선정하였다.

$$\text{따라서, } T_w \approx 0.7 C_T R_T = 0.7 \times 0.01 \times 10^{-6} \times 10 \times 10^3 = 70[\mu\text{sec}]$$

그림 4.9는 인터럽트 펄스 발생회로이다.

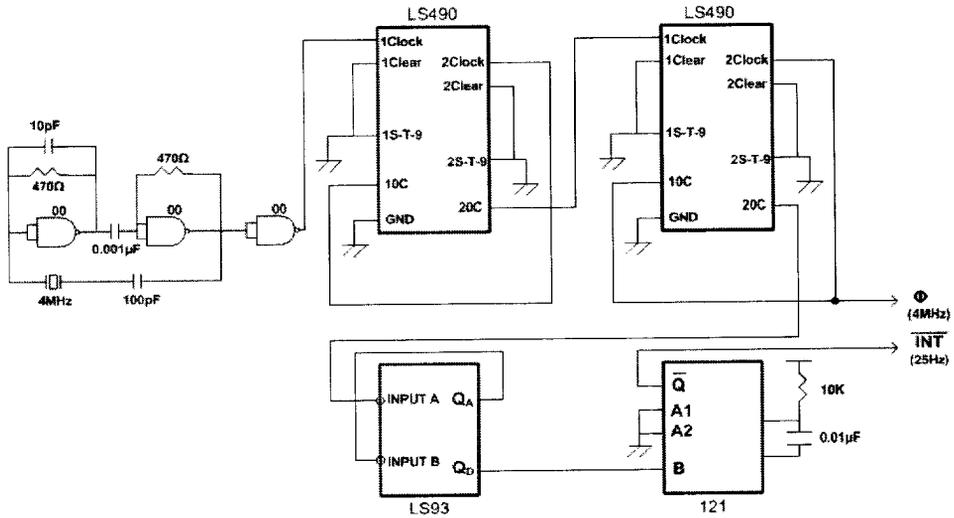


그림 4.9 인터럽트 펄스 발생회로

4.5.3 카운터 회로

본 시스템의 카운터는 매 샘플링 타임마다 **clear**하고 다음 샘플링까지는 행해지지 않는 카운터이다. 이것으로부터 카운터 된 값은 단위시간당의 이동거리 즉, 속도 데이터로서 사용될 때 총 이동거리는 카운터 한 값을 모두 가산한 것이 된다. 이때 몇 비트의 카운터가 필요한가가 문제이다. 로봇의 다이아 반경이 **0.625** 감속 치차의 치차비가 **20**이기 때문에 **1[m]** 이동에 발생하는 펄스는 $\frac{1}{2\pi \times 0.625} \times 20 \times 500 = 25465[\text{pulse/m}]$ 이다.

로봇의 최고속도는 **1[m/sec]**, 샘플링 시간은 **40[msec]**로 설계하였기 때문에 **40[msec]**당 최고 펄스는 $25465 \times \frac{40}{100} = 1019[\text{pulse/40msec}]$ 이 되어서 **10bit(1024)**이상이 되는 것이 좋다.

본 시스템은 여유를 고려하여 **16bit** 카운터로 구성한다. 소자로는 **4bit**

up down 카운터 LS193을 이용하여 정회전에서는 카운터 up하고 역회전에서는 카운터 down한다. 샘플링시에는 다음 8bit 쓰리스 데이터 버스가 치부된 D형 FF, LS374에서 데이터를 매치하고 다음에 카운터를 clear한다. FF의 데이터를 A포트에서 취한다.

이 일련의 동작은 C포트의 상위 4bit에서 제어하고 있다. 즉, 그 제어 순서는 아래와 같다.

- 1) LS374를 래치(PC6->1)
- 2) LS193을 clear(PC4->1)
- 3) LS193을 로드(PC5->1)
- 4) 하위 8bit를 취하고(PC7->1)
- 5) 상위 8bit를 취하고(PC7->1)

다음 현재 어느 쪽의 데이터가 출력되는가를 판단하기 때문에 JK-FF (LS73)의 Q출력을 PC2에 읽게 한다. 또한 인코더의 Lead, Lag 의 펄스를 D-FF(LS74A)를 통하여 PC4, PC1에 취한다. 회전방향의 관계를 표 4에 나타냈고, 카운터 회로도 는 그림 4.10에 나타냈다.

표 4 회전방향

방 향	PC1	PC0
정 회전	1	0
역 회전	0	1

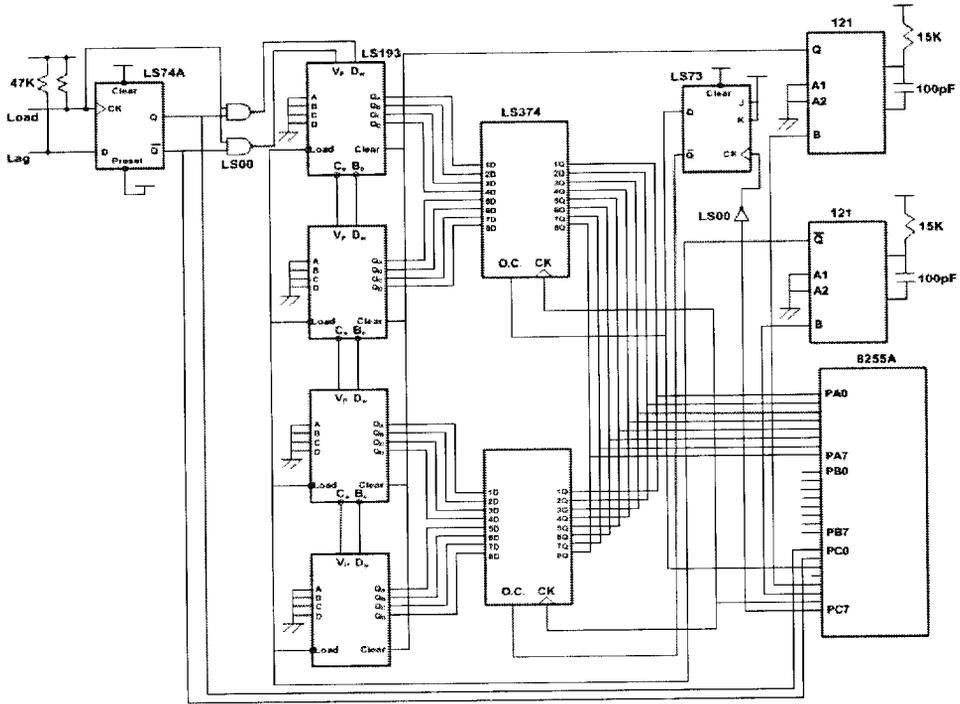


그림 4.10 카운터 회로

4.6 I/O 포트

80계열에서 병렬 I/O 디바이스로 확장하여 사용된 8255(PPI)를 사용하여 Z80A와 외부기기와의 데이터 수송을 직접 행한다. 8255N은 A, B, C의 3포트가 있고 제어 워드를 주는 것으로서 사용할 수 있다. 본 시스템에서는 모드 0에서 A포트는 입력, B포트는 출력, C포트 상위는 출력, C포트 하위는 입력으로 사용하기 때문에 control word는 (10010001)=91h이다. 각 포트의 할당을 표 5에 나타낸다. 전동기 한 대에 8255 한 대를 사용한다.

PC9801의 외부기기를 접속하는 경우 많은 PC8013으로 I/O포트 탐스를 이용한다. 본 시스템도 PC8013을 사용하게 되고, 전용 기판에 8255 2개

를 I/O 포트용으로 제작하였다. 그림 4.11은 제작한 회로이다. 다음 PC8810대신에 MP88에 사용할 수 있도록 전용 IP 포트도 제작하였다. 그림 4.12는 그 회로이다.

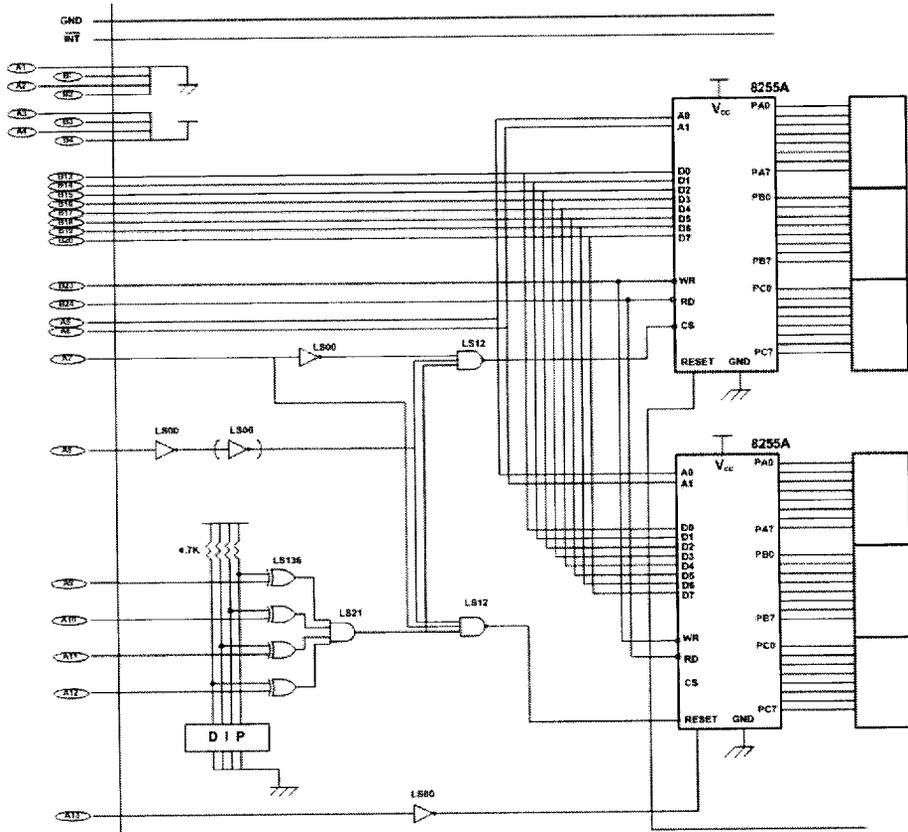


그림 4.11 I/O 포트 회로

표 5 포트 할당

포트	내용	
A	PA0~ ~PA7	카운터 데이터 읽기용 16bit 카운터에서 8bit 이동읽기
	PB0~PB3	PWM 데이터 출력
B	PB4~PB5	회전방향 데이터 출력
	PB6~PB7	미 사용
	PC0~PC1	회전방향 검출PC0 (0: 정회전, 1: 역회전)
C	PC2	현재 상위, 하위 내의 데이터가 검출
	PC3	미 사용
	PC4	카운터를 clear
	PC5	카운터를 clear
	PC6	락치의 펄스 출력
	PC7	상위, 하위 선택용 JK-FF에의 펄스 출력

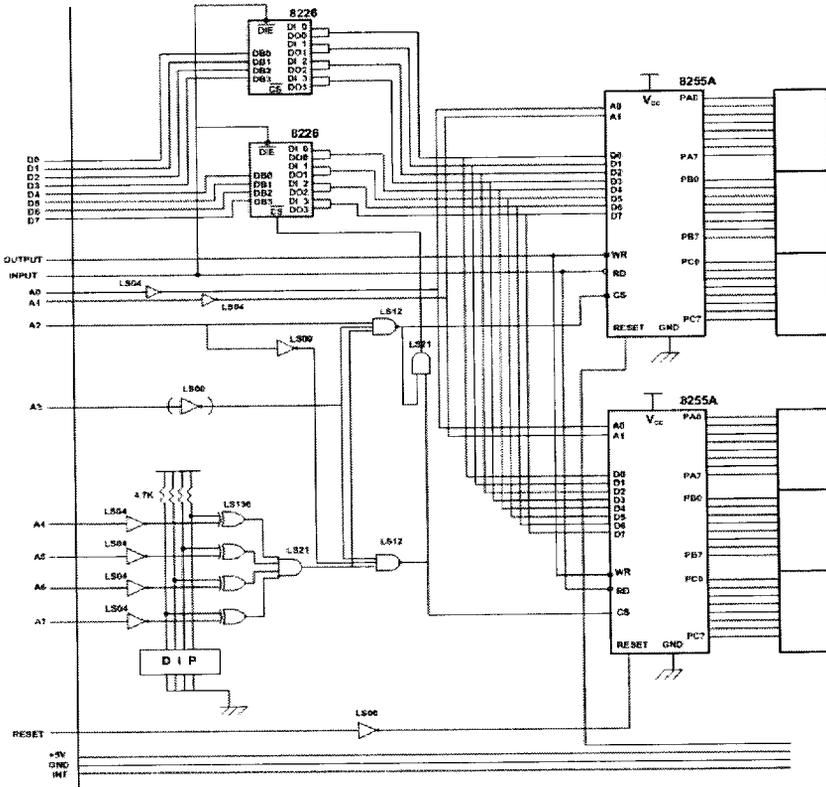


그림 4.12 MP88 전용 I/O 포트 회로

4.7 정수의 결정

4.7.1 전동기 부분의 정수

관성 모멘트는 식 (4.1)로 구하고 단위는 $[g \cdot cm \cdot sec^2] = 980 \times 10^{-7}$

$[Kg \cdot m^2]$ 로 변환한다.

$$J = J_m + J_e + \frac{J_t}{2} + \frac{Mr^2}{2n^2} \quad (4.1)$$

$$J_t = r^2 m / 2 \quad (4.2)$$

여기서,

J_m (D.C. 전동기의 회전자의 관성 모멘트) : $0.0000392 [Kg \cdot m^2]$

J (전동기축에 환산한 관성 모멘트) : $0.000790 [Kg \cdot m^2]$

J_e (인코더의 관성 모멘트) : $0.00000196 [Kg \cdot m^2]$

J_t (차륜의 관성 모멘트) : $0.00326 [Kg \cdot m^2]$

M (로봇 본체의 질량) : $100 [Kg]$

r (로봇의 동륜 반경) : $0.77 [m]$

m (차륜의 질량) : $1.1 [Kg]$

n (치차비) : 20

4.7.2 전류 피드백 정수

전류 피드백은 전자회로에 의해 행하여지고 그림 4.13은 $1/K_i$ 의 값을 구하기 위해서 회로적으로 실현한 것을 나타낸다.

전류 센서에서 전동기에 흐르는 전류에 비례한 전압이 출력되어 이 전압이 인스트루멘테이션 앰프에 들어간다. 이것에 출력된 값은 A/D 컨버터를 통해서 디지털 값으로 변환되어 컴퓨터에 들어간다.

이 회로의 동작 원리는 다음과 같다.

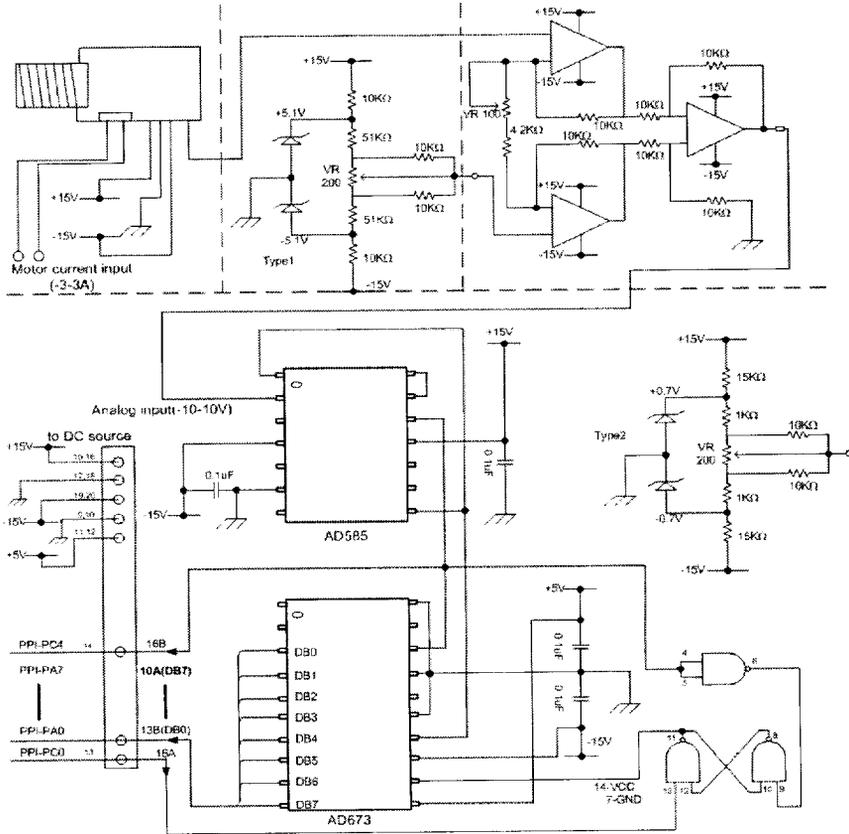


그림 4.13 전류 피드백

그림의 ①은 Op-Amp 3개를 사용한 인스트루멘테이션 앰프이다. 일반적으로 인스트루멘테이션 앰프는 차동입력으로 이득이 정해져 있는 증폭기의 것을 말한다. 이 증폭기는 센서 출력 등의 신호를 고정도로 증폭하는 회로이다. 회로로써는 식(4.3)에 나타낸 이득의 비반전 증폭단과 이득 1의 차동 증폭단으로 2단 증폭된다.

$$\frac{V_o}{V_i} = 1 + 2 \frac{R_2}{R_1} (= 1 + 2 \frac{R_3}{R_1}) \quad (4.3)$$

여기서,

V_o : 출력 전압, V_i : 입력 전압

우수한 점으로써 차동회로의 성능은 저항 평행(바란스) $R_2 = R_3$, $R_4 = R_5$, $R_6 = R_7$ 로 결정되고 평행이 무너지면 코먼 모드 전압(신호원이 접지에서 떠있는 경우 옆 측 접지에도 떨어져 있는 장소에 있을 때에 접지 전위차등에 의해 2개의 입력 선에 노이즈가 생겨 발생하는 전압)의 제거 특성이 나쁘게 되지만, 이득 조정은 R_1 만을 가변하면 되므로, 저항 평행을 무너트리지 않고 조절할 수 있다. $R_2 \sim R_7$ 을 같은 값으로 하면 좋은 평행을 얻을 수 있다.

그림 ②는 옵셋 조정을 하기 위한 회로이다. 이상적인 OP-Amp에는 2가지의 입력 전압을 모두 영으로 하면 출력 전압도 0이 된다. 그러나 실제의 Op-Amp는 출력 전압이 나타낸다. 증폭기로서 이용되는 경우에는 이 전압이 0이 되지 않으면 안 된다.

출력 전압이 나타나는 이유는 이 차동 증폭회로가 완전한 바란스 상태가 되지 않고, 콜렉트 전류의 차가 발생해서 이것이 증폭된 출력으로 나타나기 때문이다. 따라서 그림 ②에 나타난 회로의 가변 저항을 조정하는 것에 의해 출력 전압을 거의 완전하게 0으로 하는 것이 가능하다 (온도, 시간, 전원전압의 변동이 없는 경우).

그림 ③은 컴퓨터에 입력하기 위한 A/D 컨버터이다. 이것은 AD585(고속 모노리식 샘플링 홀드 증폭기), AD673(고속 8비트 A/D 컨버터)의 2가지가 있지만, 실제로 아날로그 값을 디지털 값에 변환하기에는

AD673 이 적합하다.

AD585는 변화가 빠른 아날로그 입력 신호를 이산화하는 경우 변환 시에 일시적인 입력신호를 축적하는 동작을 할 수 있다. 이것을 사용하면 입력 신호의 변화 속도에 변환속도가 따라가지 못하는 A/D 컨버터에도, 입력신호의 순시값을 A/D 변환하는 것이 가능하다.

그림 4.14는 샘플링 홀드의 원리를 간단히 나타낸 것이다. 동작원리는 스위치 ON 일 때 $V_{hold} = V_{Input}$ 가 되어 콘덴서에 충전되고 샘플 동작이 스위치 OFF 할 때에 순간의 전압이 콘덴서에 유지되는 홀드 동작이다.

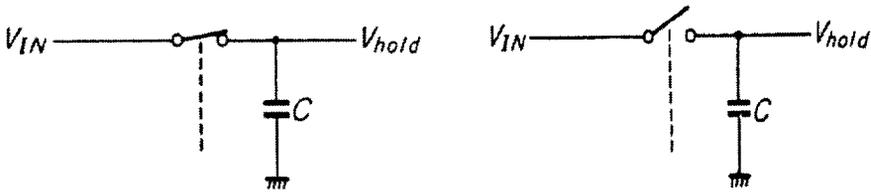


그림 4.14 샘플 · 홀드 원리

여기서 A/D 컨버터에 의해 아날로그 값이 어떻게 디지털 값으로 컴퓨터에 입력된 것을 설명한다. AD673는 8비트의 플랜지가 5[V]인 A/D 컨버터이며, 이것에 2.7[V]의 입력이 걸리면 변환치는 $(2.7/5) \times 256 = 138.24$ 가 된다.

소수점이하는 나오지 않기 때문에 138 라고 하는 값이 나온다. 정확하게 말하면 10001010가 AD673에서 출력된다.

예를 들면, 전동기에 출력된 전류가 2[A]라고 하면, 전류센서의 출력은 0.5[V]가 된다. (실제로 측정하여 나타난 값) 이 전압이 인스트루먼트이션 앰프에 걸려 증폭된 출력값은 2.7[V]가 된다. (이것도 실제에 측정한 값으로 식(4.9)로 계산하면 2.8[V]되고 거의 같은 것을 알 수 있다),

여기서 $1/K_i$ 을 구한다. 2[A]의 전류가 0.5[V]로 된 것이므로 0.25배 이다. 또한 0.5[V]가 2.7[V]에 증폭된 것이므로 5.4배 되고 $1/K_i$ 의 값은 $0.25 \times 5.4 = 1.35$ 가 된다. 그러나 이것은 시뮬레이션을 했을 때의 값이고 실제는 컴퓨터에 넣기 위해, 디지털 변환한 값을 고려해서 입력한다. 이 경우 위의 계산에 의해 2.7[V]가 138 즉, 51.1배 되므로 $1/K_i = 1.35 \times 51.1 = 69.12$ 가 된다. 시뮬레이션에서 $1/K_i = 1.35$ 이다.

4.7.3 그 외의 정수

Amp는 컴퓨터에 의해 변경할 수 있고, K_1 과 T_i 는 다음절에서 행하는 시뮬레이션에 의해 적절한 값을 결정하기 때문에 처음에는 적당한 값에 설정해 둔다.

그리고 K_c 는 다음과 같이 구한다. 인코더는 전동기축 1회전에 2000 펄스를 카운트하기 때문에 속도로 바꾸면 $\pi/1000[\text{rad/s}]$ 가 된다. 이 속도를 차륜의 속도에 변환하는 것이므로 이것에 치차비($\frac{1}{20}$)을 곱한 것에 의해 구해진다.

4.8 치차비의 선택

직접 전동기축에 타이어를 붙여서 회전시켜도 토오크가 적기 때문에 필요한 구동력을 얻을 수 없다. 그렇기 때문에 치차를 매개로 하여 토오크를 증폭시키는 것을 생각할 수 있다. 이 경우 전동기 축의 회전 각도를 θ , 로봇본체의 이동거리를 x_1 , 타이어의 반경을 r , 치차비를 n 이라 하면 식(4.4)이 성립한다.

$$\begin{aligned}
 x &= \frac{r\theta}{n} \\
 \frac{dx}{dt} &= \frac{r}{n} \frac{d\theta}{dt} \\
 \frac{d^2x}{dt^2} &= \frac{n}{r} \frac{d^2\theta}{dt^2}
 \end{aligned}
 \tag{4.4}$$

전동기에 필요한 토크는 식(4.5)이다.

$$T_M = (J_M + J_E + J_L + \frac{J_T}{n^2}) \frac{d^2\theta}{dt^2} + T_n + \frac{B \cdot M r}{n}
 \tag{4.5}$$

여기서

J_L : 부하를 전동기 축으로 환산한 관성 모우먼트

J_M : 전동기의 관성 모우먼트, J_E : 인코더 관성 모우먼트

J_T : 타이어 관성 모우먼트, B : 타이어의 마찰계수

T_n : 축 마찰 토크, M : 로봇질량

이때 실제 설계한 각 정수는 다음과 같다.

$$J_M = 0.29 [gcm \cdot sec^2], \quad J_E = 0.02 [gcm \cdot sec^2]$$

$$M = 100/9.8 [Kg \cdot sec^2/m], \quad m = 1.1/9.8 [Kg \cdot sec^2/m]$$

$$B = 0.1 \times 10^{-2} [m], \quad T_n = 0.15 [Kg \cdot cm], \quad \tau = 0.0625$$

따라서 토크 T는 식(4.6)이다

$$T_M = (4.96 \times 10^{-3} \times n + \frac{32.2}{n}) \frac{d^2x}{dt^2} + 0.15 + \frac{5}{n}
 \tag{4.6}$$

최고속도 $\left. \frac{dx}{dt} \right|_{\max} = 1 [m/sec]$ 라 하면은 전동기 토크와 회전수는 식(4.7)이 된다.

$$T_M = 0.15 + \frac{5}{n} \quad (4.7)$$

$$N = \frac{1 \times 60 \times n}{2 \times 0.0625 \times \pi} = 152.8n$$

식(4.7)에서 $n=1 \sim 30$ 일 때 T, N 의 관계를 그림 4.15에 나타내었다. 이 그림에서 $B=0.5 \times 10^{-2} [cm]$ 인 경우에도 같이 나타내었다.

이 그림에서 $n \geq 15$ 에서는 마찰계수가 어느 정도 변화하여도 연속정격영역 내에서 운전할 수 있는 것을 알 수 있다.

또한 이 범위에서 가속도 $\frac{d^2x}{dt^2} = 0.5$ 로 하면 $B=0.5 \times 10^{-2} [m]$ 에서도 $n \geq 15$ 에서는 $T \leq 2.93 [Kg \cdot cm]$ 이기 때문에 전동기의 순시 최대 토크 12.5 $[Kg \cdot cm]$ 에 비하여 매우 적다.

이상에서 $n \geq 15$ 로 하면 되지만 차륜의 크기, 치차의 크기를 고려하여 $n=20$ 으로 한다.

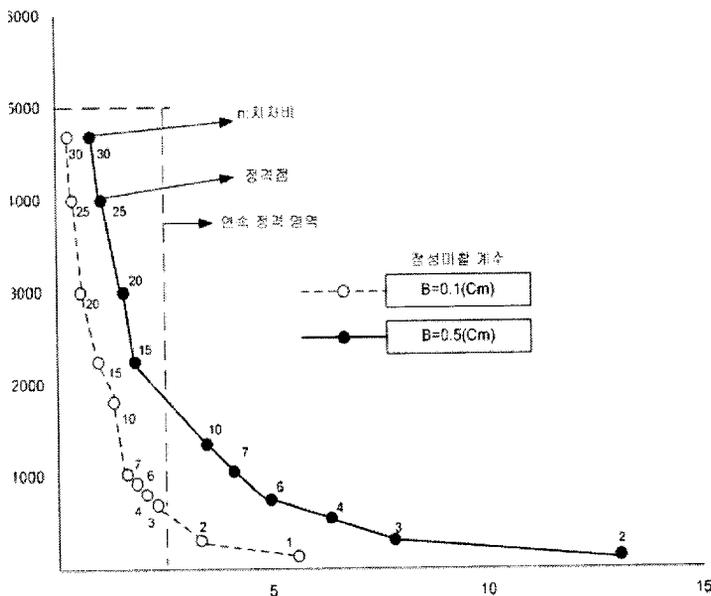


그림 4.15 정상상태 운전점

제 5 장 시뮬레이션

본 장에서는 설계한 작업모델 로봇의 동작을 확인하기 위해서 우선 로봇의 이동제어계를 스텝응답, 삼각파 속도지령 및 대형 속도지령에 대하여 독립으로 시뮬레이션 실험을 행하고 그 결과를 검토한다. 그리고 이동과 장력 일정유지 시스템을 통합하고 하이브리드 제어를 한다. 설계의 유용성을 조사한다.

5.1 시뮬레이션 환경

본 연구에서 설계한 직류 서보시스템을 적용한 고정도 속도제어의 적합성을 검증하기 위하여 디지털 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션에서 제어알고리즘은 **Matalab**의 **M-파일**을 통한 프로그램으로 작성하고, 직류전동기의 기계적인 요소와 전기적인 요소는 **Simulink**를 사용하였다 [12].

3장에 나타낸 블록선도를 기준으로 시뮬레이션 프로그램을 작성한다. 그림 5.1은 **PI**제어기를 넣어서 구성한 속도제어 시스템이다. 이것에서 아직 정해지지 않았던 비례요소 K_1 적분요소 T_i 을 구한다.

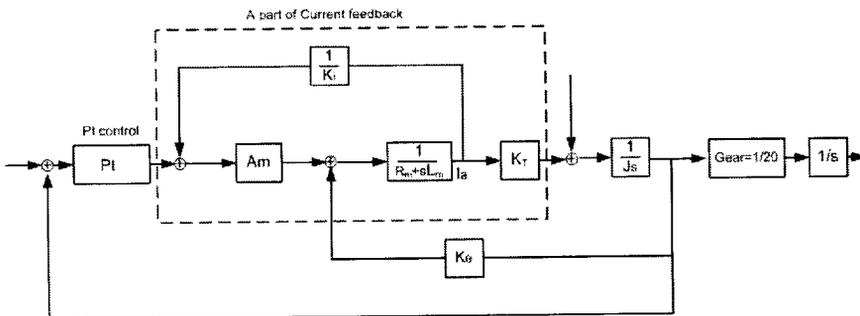


그림 5.1 PI제어기를 포함한 속도제어 블록선도

전동기부 전달함수 $G(s)$ 는 다음과 같다.

$$G(s) = \frac{0.9705}{13.43 \times 10^{-7} s^2 + 84.84 \times 10^{-4} s + 0.0042} \quad (5.1)$$

$$\begin{aligned} G_p(s) &= \frac{A_m K_T}{JL_a s^2 + J(R_a + \frac{A_m}{K_i})s + K_T K_E} \\ &= \frac{97 \times 10^{-2}}{13.43 \times 10^{-7} s^2 + 97.96 \times 10^{-4} s + 42 \times 10^{-4}} \end{aligned} \quad (5.2)$$

이 블록선도는 전동기부분과 특성보상요소의 PI제어 부분이 직렬로 연결되어 속도를 피드백 하는 것으로 생각할 수 있다. 여기서 정수 K_1 , T_i 을 구하기 위해 3가지의 값을 결정하지 않으면 안 된다.

먼저, 로봇의 시정수를 구하면, $\tau = \frac{RJ}{K_e K_m}$ 에서 $0.24458[s]$ 이 된다.

다음에 프로세스 부분의 이득을 구한다. 프로세스부의 입력에 15을 대입하면 출력은 231.006이 되고 이득 Amp가 15.4004로 되어 있는 것을 알 수 있다.

이외에 부동작 시간은 신호가 늦어진 시간을 말한다. 보통 외란이 없으면 0 이지만, 그래도 샘플링 시간이나 치차의 뒤틈(Back 슬래시) 등에서 어느 정도의 부동작 시간이 생긴다. 여기서 치차의 뒤틈을 5[ms], 샘플링 시간을 0.001[ms]으로 하면 부동작 시간 T를 6[ms]로 한다.

이 3가지에서 최적의 K_1 , T_i 을 구할 수 있다. T_i 는 로봇의 시정수와 함께 $T_i = 0.24458[sec]$ 로 하고 K_1 는 $K_1 = \frac{0.6\tau}{KT}$ 에서 상기의 값을 대입하는 것에 의해 1.58814가 된다. 이상 같이 모든 정수의 값이 정해진 것으로 된다. 이것 등의 값을 대입하고 C언어로 시뮬레이션 한다.

표 6은 시뮬레이션에 사용한 전동기 정수 및 파라미터의 기호와 단위이고 표 7는 전동기 정수이다. 표 8는 이상과 같이 구한 제어정수이다.

표 6 파라미터 및 변수기호와 단위

기 호 설 명	단 위	기 호 설 명	단 위
ω_i (입력 목표)	[rad/s]	ω (전동기축 각속도)	[rad/s]
ω_0 (출력 목표)	[rad/s]	$1/K_f$ (비례 정수)	1.35 [Ω]
K_f (비례 요소)	[V/(rad/s)]	K_T (토크 정수)	[$N \cdot m/A$]
T_i (적분 요소)	[s]	V_a (전기자 전압)	[V]
J(관성 모우먼트)	[$Kg \cdot m^2$]	I_a (전기자 전류)	[A]
K_E (역기전력 상수)	[V/(rad/s)]	T_M (정격 토크)	[$N \cdot m$]
T_f (외란 토크)	[$N \cdot m$]	$\frac{1}{r+sL}$ (전동기)	[1/ Ω]
R_a (1.3)	[Ω]	L(1.7)	[mH]

표 7 전동기 정수

토크 정수 (K_T)	0.0647 [$N \cdot m/A$]
전기자 저항(R_a)	1.3 [Ω]
전기자 인덕턴스 (L)	1.7 [mH]
유도 기전력 정수(K_E)	0.0649[V/(rad/s)]
관성 모우먼트(J)	0.00079 [$Kg \cdot m^2$]

표 8 제어 파라미터 값

증폭기(Amp)	15
적분요소(T_i)	0.24458[sec]
비례요소[$K_p(K_1)$]	1.58814
변환정수(K_2)	1/20
변환정수(K_C)	1/20

표 9는 그 외의 정수를 나타낸다. 여기서 K_C 는 실제 컴퓨터에 입력할 때의 값이고, 블록선도에서 시뮬레이션 할 때는 K_2 와 같은 값이 된다.

표 9 기타 정수

전동기 축을 차륜의 각 속도에 변환하는 정수 (K_2)	1/20
인코더 값을 각속도로 변환하는 정수 (K_e)	$\pi/1000$
인코더 값을 차륜의 각속도에 변환하는 정수 (K_C)	$\pi/2000$

5.2 시뮬레이션 방법

블록선도에 의해 나타낸 작업모델로봇을 시뮬레이션하기 위해 우선 각 블록을 라플라스 역변환에 의해 시간영역으로 나타낸다. 시간 영역에 나타낸 미분방정식은 오이라 법을 이용해서 계산한다. 프로그램은 양자화 오차나 시간지연을 고려하여 실제의 모델을 바르게 나타내도록 주의한다.

특히 전류나 전압의 제한은 곧 알 수 있지만 기계 부분의 일반적인 마찰이나 저항은 일반적으로 측정할 수 있는 양이 아니기 때문에 주의가 필요하다.

모델작성은 실제로 모델로봇의 작성을 고려하고 시뮬레이션으로 가능한 충실하게 재현 할 수 있도록 한다. 또 역으로 시뮬레이션은 상당히 재현하기 힘든 것, 다시 말해 운동 방정식에 나타낼 수 없는 것이 있지만 가능한 배제한다. 완전히 배제할 필요는 없지만 배제한 쪽이 모델로서는 간단한 것이고 제어 파라미터의 결정도 쉽게 된다. 그 주변을 고려해 시뮬레이션을 한다. 또, 모델을 실제로 작성하는 것에서 시뮬레이션과 서로 비교함으로써 문제점을 확실하게 조사하는 것이다.

이동작업모델 로봇의 제어장치를 구성하기 위해서는 각 부분의 특성을 조사해야한다. 그 특성을 시뮬레이션 프로그램으로 변환하는 것에 의해 모

델로봇의 파라미터를 측정하고 최후로 전체의 세부 파라미터를 결정한다.

이동작업모델로봇의 동작의 특성을 보기 위해서 이동계를 동작시킨 경우의 시뮬레이션을 한다.

시뮬레이션에 부여된 과제는 서로 비교를 하고 시뮬레이션에 의해 모델이 바르게 나타내는 것이 확인되면 각각의 제어 파라미터를 결정한다.

실제의 프로그램은 C++에 의해 작성하고 블록마다 목적파일 모아서 이후, 추가작성에도 유연하게 대응할 수 있도록 했다. 또 데이터의 표시에도 유연하게 대응할 수 있도록 한다.

이상의 프로그램을 사용해서 이동작업모델로 로봇의 시뮬레이션을 했다.

5.3 시뮬레이션 결과

5.3.1 속도스텝응답

속도제어장치를 구성하기위해서 전동기의 특성과 차대의 특성을 조사 한다. 여기서 전동기를 차대에 부착하여 스텝전압을 전동기에 인가하여 스텝 응답을 측정한다. 그림 5.2는 1차 지연계로 근사화한 직류전동기 각 스텝 입력 전압에 대한 시뮬레이션 속도응답이고 그림 5.3은 각 스텝 입력 전압에 대한 측정 속도응답을 나타낸다.

그림 5.4는 전동기 직류 이득 $Gain = \frac{[Velocity\ count]}{[Input\ voltage]}$ 의 측정치와 이론치를 나타낸다.

이상의 결과에서 전동기 속도응답은 오버슈트 있고 입상시간이 긴 것을 알 수 있다. 이 상태에서 제어를 행할 경우 발진 할 가능성이 있고 실제 응답은 발진하고 있는 것을 알 수 있다. 이상의 실험에서 이동로봇을 제어할 경우 안정 동작을 하도록 대책이 필요하고 그 대책으로 속도제어 파라미터를 적절히 선정하는 것이다.

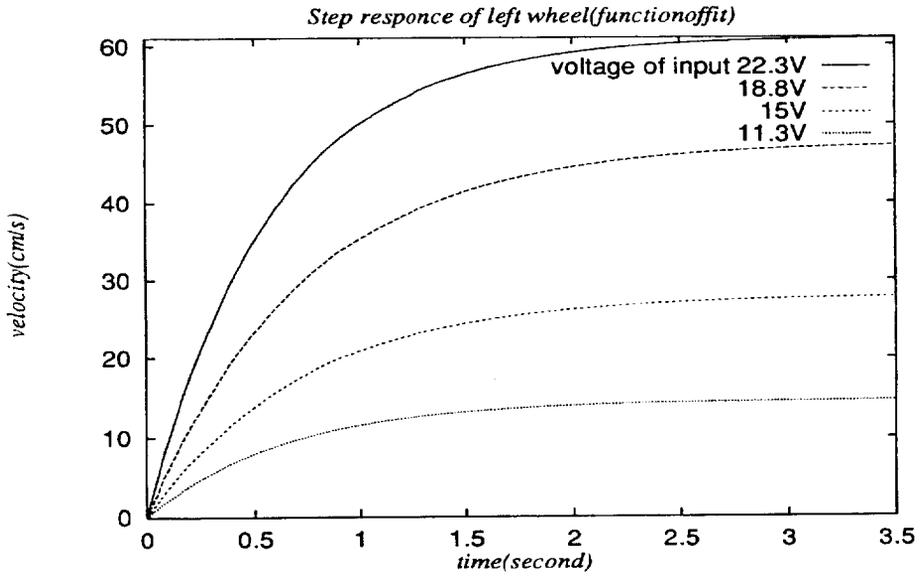


그림 5.2 스텝 입력전압에 대한 1차지연 근사화 속도응답

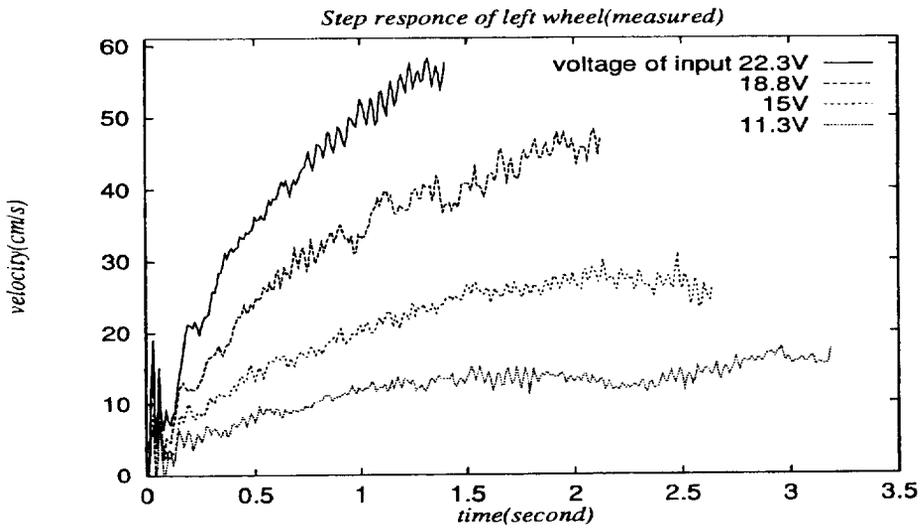


그림 5.3 스텝 입력전압에 대한 실측 속도응답

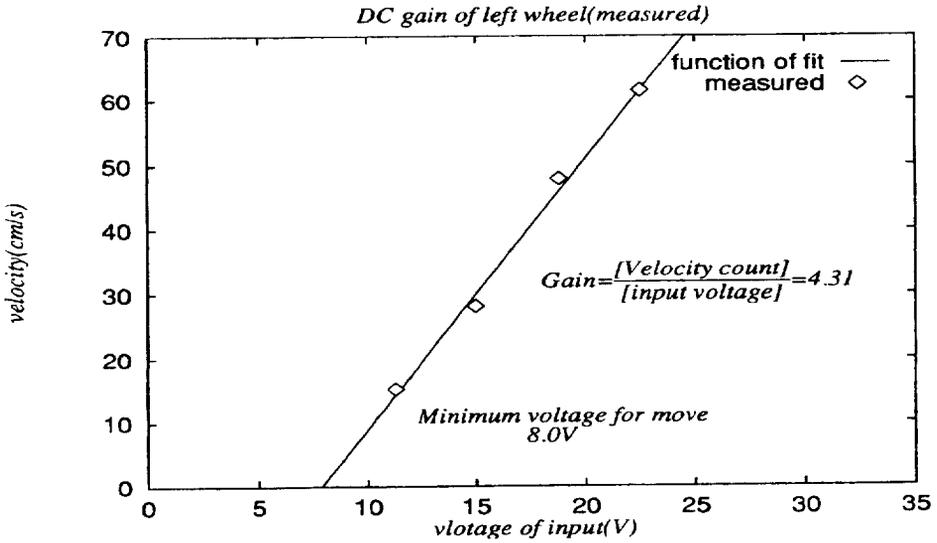


그림 5.4 전동기 직류이득 특성

이상의 실험에서 나타난 이동계의 문제점을 해결하기 위해서 PI제어를 행하며 시뮬레이션에 의해 세부 조정을 하여 파라미터는 $K_p=2.0[\text{sec}]$,

$T_i=0.5[\text{sec}]$ 로 결정을 하였다. 그림 5.5는 PI제어 할 때 이동계의 스텝 입력 전압에 대한 속도응답 시뮬레이션 결과를 나타내고 그림 5.6은 전동기 직류 이득 특성 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 이 결과에서 시뮬레이션의 전동기 특성은 1차 지연계로 근사화 하였기 때문에 실 시스템과 약간의 오차가 있다.

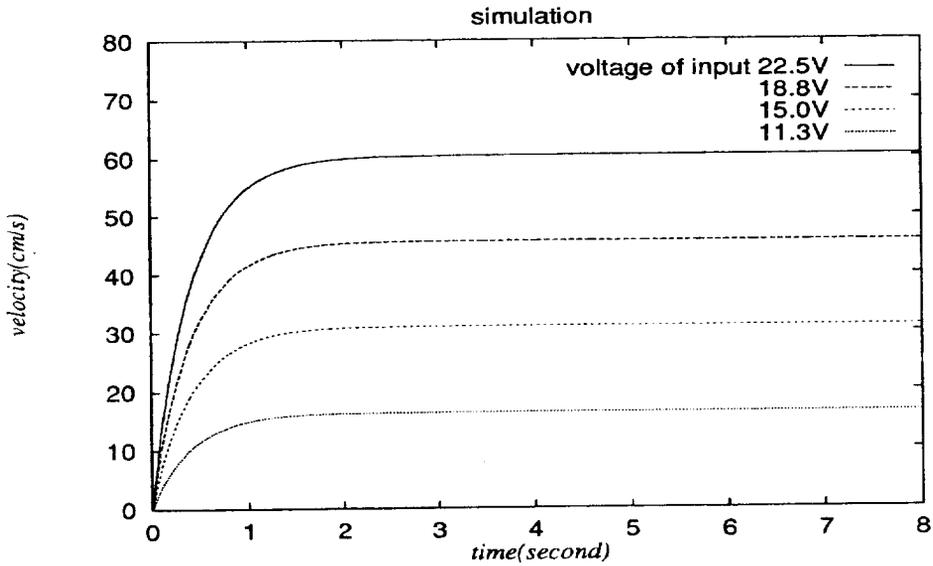


그림 5.5 이동계의 스텝입력 전압에 대한 속도응답 시뮬레이션

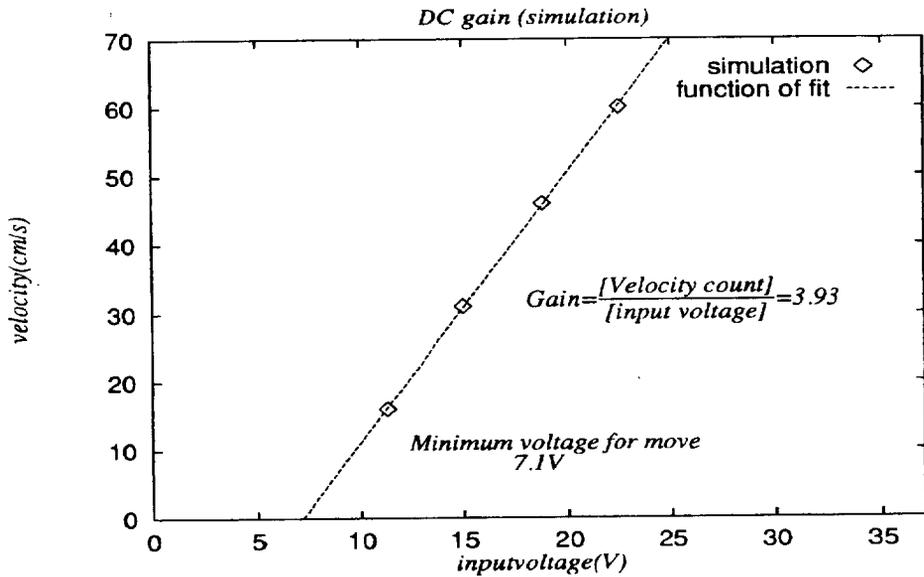


그림 5.6 전동기 직류 이득 특성 시뮬레이션

5.4 속도 지령값에 의한 시뮬레이션

이동계에 있어서 비간섭화는 제어기의 적분기에 의해 하는 것으로 한다. 하지만 서로 영향이 있는 것은 확실하다. 이동을 위한 속도 프로필은 효율 면이나 간섭의 저감 때문에 최적의 것을 선택할 필요가 있다. 일반적으로 효율을 생각하면 프로필은 생긴 모양이 삼각에 가까운 형태가 된다. 이 프로필은 이동하고 싶은 거리와 장력 지령값에서 산출할 필요가 있다. 이번 시뮬레이션은 동일 거리를 이동하는 이동속도 프로필을 대형과 삼각형을 이용해서 시뮬레이션을 행하고 실험에 있어서는 대형의 속도 변화를 완만하게 하도록 2차 곡선으로 연결된 완만 대형에 대해서도 실험을 했다.

그림 5.7과 그림 5.8은 대형 속도지령 및 삼각형 속도지령에 의한 이동계의 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 그래프는 위에서 차례로 속도 지령, 전동기 전압, 전동기 전류, 대차의 실제 속도를 나타낸다. 이 결과와 실제의 이동작업모델 로봇의 동작을 비교하는 것에 의해 시뮬레이션의 올바름을 확인할 수 있다. 이동계의 속도제어는 PI제어이고 파라미터는 이동용 전동기의 스텝응답에서 20% 오버슛의 조건에서 가장 적응성이고, 정상 특성의 좋은 것을 사용했다.

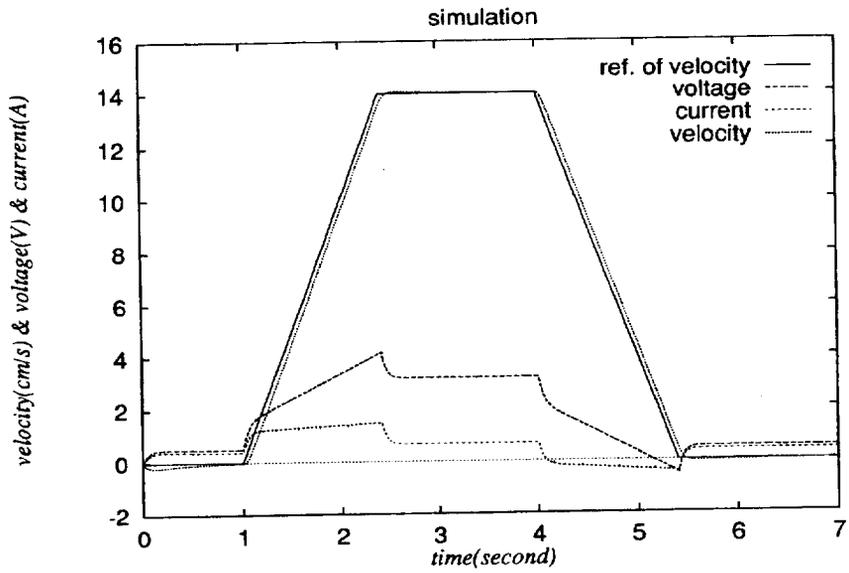


그림 5.7 대형 속도지령에 대한 이동계의 응답

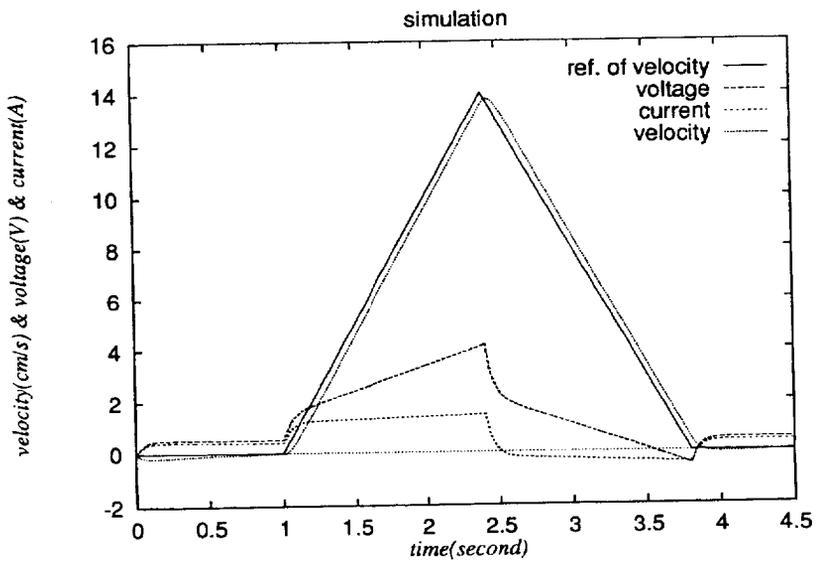


그림 5.8 삼각 속도지령에 대한 이동계의 응답

제 6 장 실험결과

본 장에서는 설계한 작업모델 로봇의 동작을 확인하기 위해서 우선 로봇의 이동 제어계를 스텝응답, 삼각과 속도지령 및 대형 속도지령에 대하여 독립 실험을 행하고 그 결과를 검토한다. 그리고 이동제어에 대한 제어이론 유용성을 검토한다.

피드백 파라미터의 선정에 의해 최적 전력변환을 행하는 방법을 앞장에서 제안하였다. 그러나 제안한 방법은 비선형시스템을 간략화 하여 실험실에서 행할 수 있는 모델에 대하여 실제 시스템에서 수행하기 전에 시뮬레이션에 의해 이를 검토하는 것이다.

6.1 실험방법

시뮬레이션에 의해 각 제어계의 파라미터를 결정했기 때문에 그 값을 이용하여 실제의 이동작업모델 로봇을 작성한다. 작성한 작업로봇은 시뮬레이션과 거의 일치한 동작을 하도록 작성하고 있기 때문에 실제의 동작을 보면 시뮬레이션의 정확성을 판단하는 것이 가능하다.

실험은 시뮬레이션으로 한 것과 같이 동작의 특성을 볼 수 있도록 순차 실험을 해간다. 먼저 이동계 단독으로 동작시킨 후 특성을 측정한다.

6.2 실험결과

그림 6.1은 스텝 입력전압 15[V]를 인가한 경우 속도응답의 이론치와 실측치를 나타내고 그림 6.2는 시간축으로 확대한 이론치와 실측치를 나타낸다. 그림 6.3은 스텝 입력전압 15[V]를 인가한 경우 전동기 전류 응답의 실측치를 나타내고 정격치를 중심으로 고주파가 발생하고 있다. 이것은 H형

브리지의 스위칭 소자 특성 때문에 발생한다고 생각된다.

그러나 이론치와 실측치는 일치하고 있음을 알 수 있다.

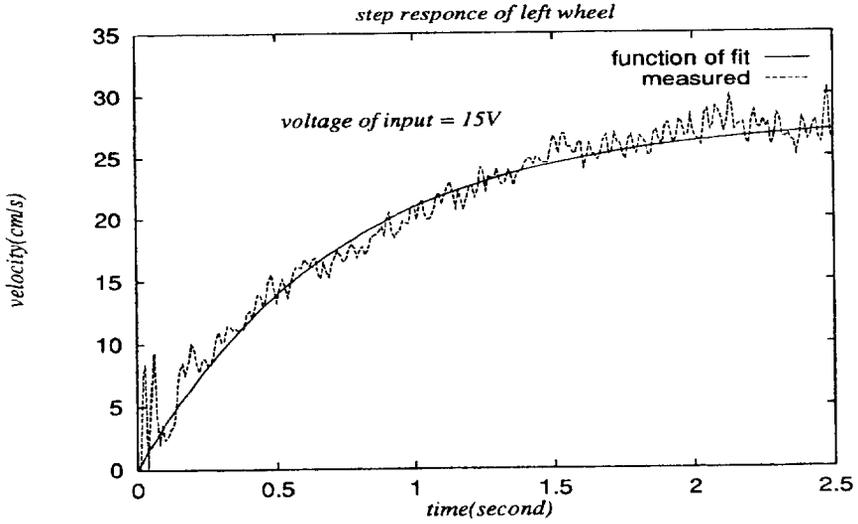


그림 6.1 15[V] 스텝입력에 대한 실속도와 1차지연 근사화의 속도응답

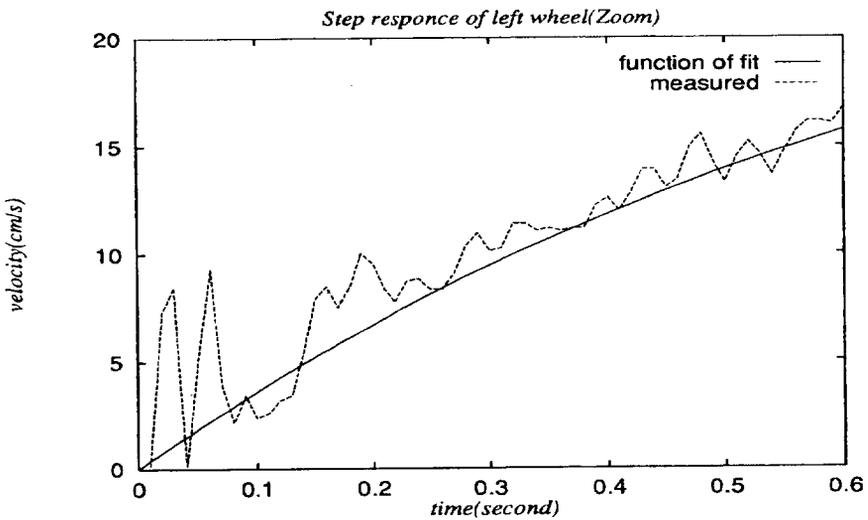


그림 6.2 15[V] 스텝입력에 대한 속도응답의 확대도

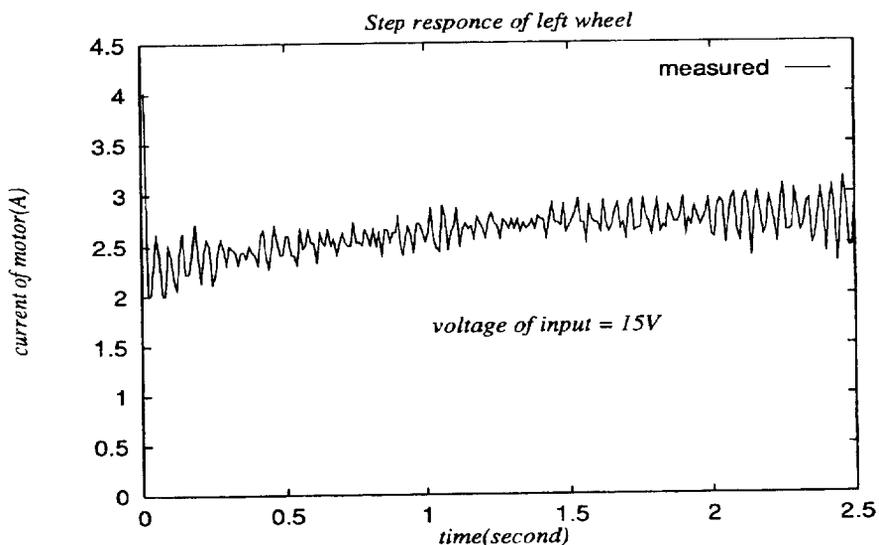


그림 6.3 15[V] 스텝입력에 대한 전류응답

다음 장력계는 동작시키지 않고, 이동계만 단독으로 동작시킨 경우 동작 특성에 대해서 측정한다. 속도 응답의 그래프는 지령속도, 이동속도의 순서로 나타나고 전류응답에 대해서는 지령 속도, 전동기 전류에 대해서 나타낸다. 그리고 지령속도 프로필에 대해서는 대형, 삼각형, 완만 대형형의 3종류로 실험을 했다.

그림 6.4는 대형 속도지령에 대한 속도응답의 속도지령과 실 측정 속도를 나타내고 그림 6.5는 대형 속도지령에 대한 전류응답을 나타낸다.

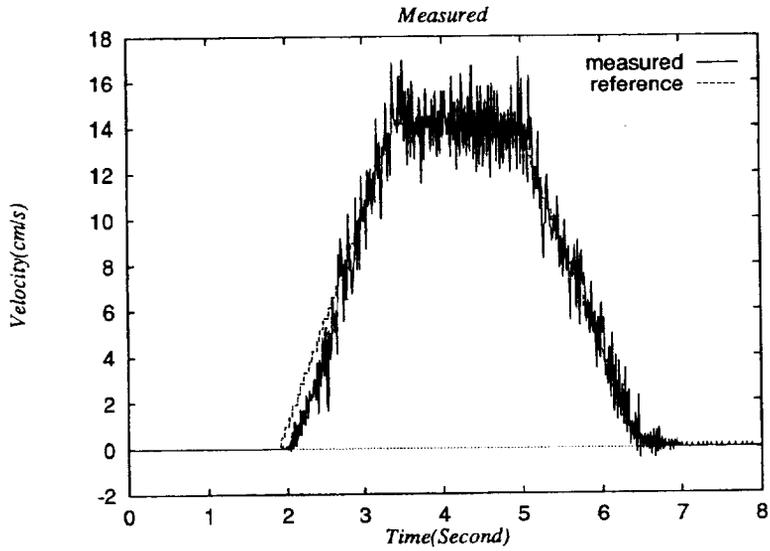


그림 6.4 대형속도 지령에 대한 속도응답

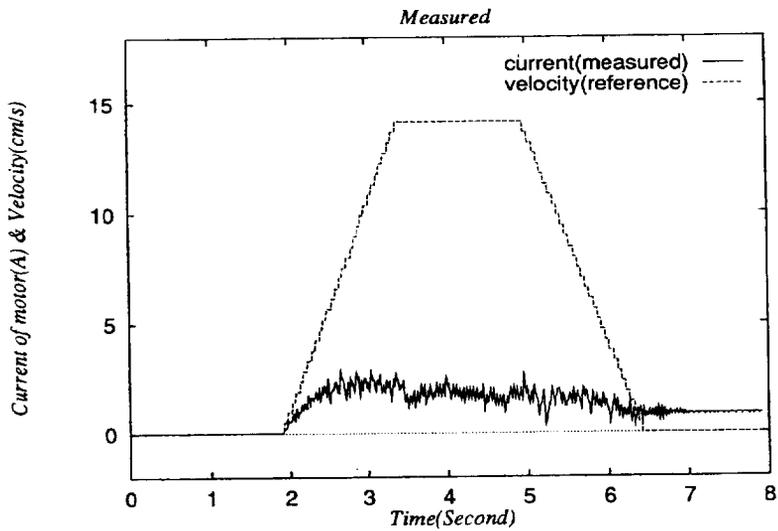


그림 6.5 대형속도 지령에 대한 전류응답

그림 6.6은 삼각형 속도지령에 대한 속도응답의 속도지령과 실 측정 속도를 나타내고 그림 6.7는 삼각형 속도지령에 대한 전류응답을 나타낸다.

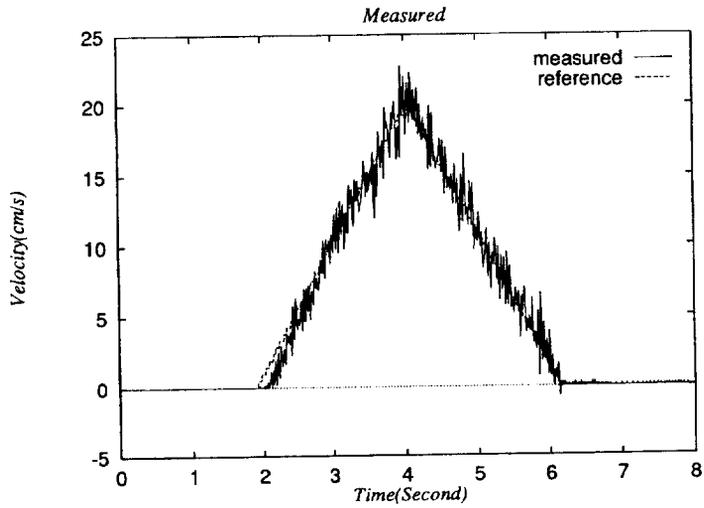


그림 6.6 삼각형 속도 지령에 대한 속도응답

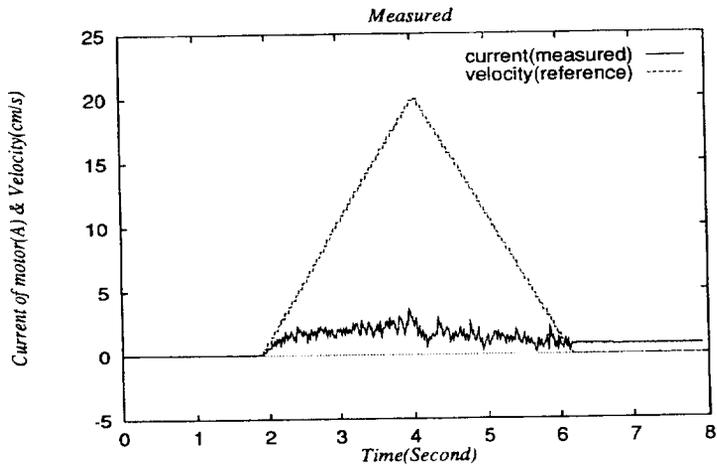


그림 6.7 삼각형 속도지령에 대한 전류응답

그림 6.8은 완만 대형 속도지령에 대한 속도응답의 속도지령과 실 측정 속도를 나타내고 그림 6.9는 완만 대형 속도지령에 대한 전류응답을 나타낸다.

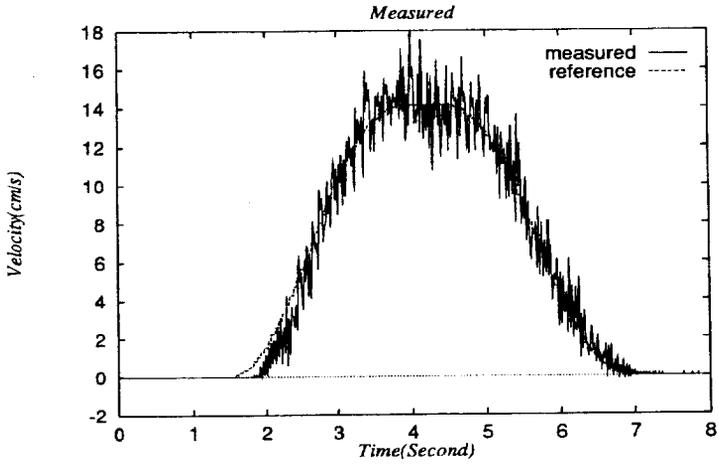


그림 6.8 완만대형 속도지령에 대한 속도응답

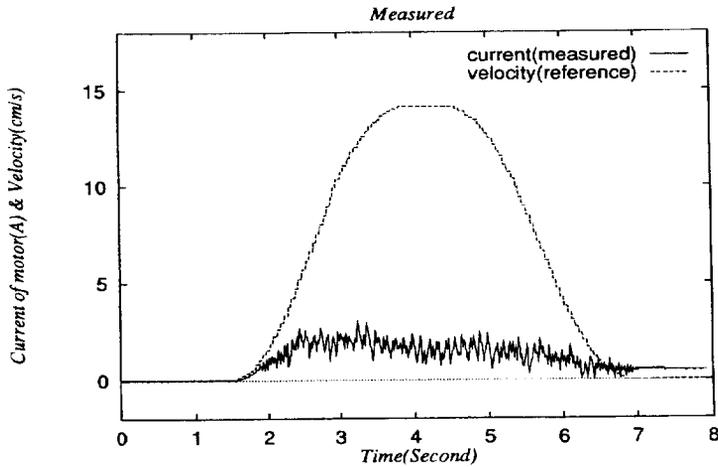


그림 6.9 완만대형 속도지령에 대한 전류응답

이상 실제 작성한 이동작업로봇 모델의 이동 제어에서 단독 운전에서는 기계적으로 다소 불완전한 부분이 있어 스텝응답에 기동시에 다소의 오버슈트가 발생하였다. 그러나 정상적인 속도나 속도지령에 대하여는 잘 동작하고 있는 것을 알 수 있었다.

제 7 장 결 론

전차 트로리선 가설작업로봇의 이동장치 제어시스템을 설계하여 실험을 통하여 다음의 결론을 얻었다.

- 1) 총 중량 **100[Kg]**를 최고 속도 **1[m/sec]**, 최대 가속도 **0.5 [m/sec²]**로 이동하는 로봇 구동장치를 설계 제작하였다.
- 2) 조타방식은 **2**개의 독립된 동륜을 회전시켜 로봇을 전진, 후진, 회전하는 **PWS(Power Wheeled Steering)**방식을 채택하였다.
- 3) 구동전동기는 로타리 인코드가 부착된 **D.C.서보전동기 (60W)**을 이용하고 제어방식은 **PWM** 펄스제어이다. 그리고 토오크를 증폭하기 위해서 감속기어를 사용하였다.
- 4) 구동회로를 설계 제작하였다.
- 5) 실제 로봇을 제어하기 전에 **PI**제어 시뮬레이션을 위해서 이동계 전체 시스템을 구성하고 모델링 하여 해석하였다.

비간섭화를 행한 것만으로는 목표의 응답을 달성 할 수 없다. 왜냐하면 각 제어 파라미터는 작업로봇의 상태에 의해 변화하기 때문이다. 이것을 실현하기 위해서 이번에 채용한 각 **PID** 보상기에 퍼지제어거나 뉴럴 네트워크에 의한 학습기능 등을 추가하고, 작업로봇의 상태 변동에 따라 파라미터를 변동시킬 필요가 있다. 하지만 파라미터 변동에 대해서는 이후의 연구 과제로 한다.

참 고 문 헌

- [1] 古賀邦彦, “張力制御のための張力計測装置の試作”, 平成7年卒業論文, 1997.
- [2] 村上慶一, “30年も電車線”, JR East R&D Symposium, pp. 176-186, 1993.
- [3] 梅嶋利彰, “オブザーバを用いた誘導モータの速度センサレスベクトル制御に関する研究”, 平成6年卒業論文, 1996.
- [4] 中傑, “加線長りのための張力制御についての研究”, 平成7年卒業論文, 1997.
- [5] 翊田芳朗, “狭い視野における作業性能を評価するための遠隔制御作業ロボットの製作”, 平成7年卒業論文, 1997.
- [6] 日本機械學會編, “メカトロニクス制御工学 (CAIシリーズ)”, 日本機械學會, 1995.
- [7] M.H.Raibert and J.J.Craig, "Hybrid position/force control of manipulators", Transaction of the ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, vol.102, pp.126-133, 1981.
- [8] Toshio Fukuda, Takanori Shibata, Masatosi Tokita, Toyokazu Mitsuoka, "Neuromorphic Control: Adaptation and Learning", "IEEE Transaction on Industrial Electronics", VOL.39, NO.6, pp.497-503, 1992.
- [9] 竹内俱佳, “永井豊,” 自律移動ロボットのファジィ誘導制御“, 日本ファジィ學會誌”, Vol.2, No.1, pp.85-94, 1990.
- [10] 遠藤耕喜, 竹内俱佳, “制御工学講義”, 昭光堂, 1998.
- [11] 前田賢, 杉江俊治, “システム制御情報學會編、アドバンスト制御のためのシステム制御理論”, 朝倉書店, 1997.

- [12] Luigi Villani, Bruno Sicilano, " An Experimental Study of Adaptive Force/Position Control Algorithms for Industrial Robot". IEEE Transaction on Control System Technology, Vol. 8, No. 5, pp. 777-786, 2000.
- [13] Di Xiao, K. Ghosh, " Sensor-Based Hybrid Position/Force Control of Robot Manipulator in an Uncalibrated Environment", IEEE Transaction on Control System Technology, Vol. 8, No. 4, pp.635-644, 2000.
- [14] Hakan Koc, Dominique Knittel, " Modeling and Robust Control of Winding Systems for Elastic Webs", IEEE Transaction on Control System Technology, Vol. 10, No. 2, pp.197-207, 20002.
- [15] T.X Mei and Roger M. Goodall, " Robust Control for Independently Rotating Wheelsets on a Railway Vehicle Using Practical Sensor", IEEE Transaction on Control System Technology, Vol. 9, No. 4, pp.599-607, 2001.
- [16] Jung-Min Yang and Jong-Hwan Kim, " Sliding Mode Motion Control of Nonholonomic Mobile Robots", IEEE Transaction on Control System Technology, Vol. 5, No. 1, pp.15-23, 1999.
- [17] Randolph Cabell and Dan Pallumbo, " A Principal Component Feed forward Algorithm for Active Noise Control : Flight Test Results", IEEE Transaction on Control System Technology, Vol. 9, No. 1, pp.76-83, 2001.
- [18] Bilin Aksun Guvenc and Levent Guvenc, " Robust Two Degree-of Freedom Add-On Controller Design for Automatic Steering", IEEE Transaction on Control System Technology, Vol. 10, No. 1, pp.137-148, 2002.
- [19] K. K. Tan T. H. Lee and S. J. Chin, " Precision Motion Control with Disturbance Observer for Pulse Width Modulated Driven Permanent Liner Motors", IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 39, No, 3, 2003.

감사의 글

오늘이 있기까지 세심한 지도와 조언으로 학문과 삶의 가치관을 새롭게 닦아주신 홍순일 지도교수님의 크신 은혜에 진심으로 감사를 드립니다.

그리고 본 논문이 완성될 때까지 충고와 격려를 아끼지 않으시며 부족한 논문을 지도해 주신 이동철 교수님, 배종일 교수님께도 감사를 드리며, 항상 학자의 자세로 지도해 주신 부경대학교 전기공학과 의 모든 교수님들에게 감사의 마음을 전합니다.

학업에 전념할 수 있도록 배려해 주신 소장님 이하 회사직원들, 퍼지제어 연구실에서 격려를 아끼지 않고 많은 조언으로 본 논문을 완성할 수 있도록 도와준 정승환에게 고마움의 마음을 전합니다.

항상 무조건적인 사랑으로 노심초사 아들을 바라보시고 정직과 성실을 말보다 행동으로 보여주신 부모님과 사랑하는 나의 아내 그리고 항상 공부한다는 이유 때문에 같이 놀아주지 못한 아들 동수와 범수에게도 이 보람을 함께 하고 싶습니다.

끝으로 본 논문이 결실이 되기까지 많은 것을 베풀어주신 주위에 모든 분들께 무한한 감사를 드리며, 이 논문의 완성으로 또 다른 새로운 시작과 도전의 디딤돌로 삼겠습니다.

2005년 12월

박 종 선