

工學碩士學位論文

西紀 2008 學年度

제어모드 변환을 통한
지능형 근력강화 시스템 개발

(Development of intelligent muscular
strength enhancement System
by control mode switching)

指導教授 이 수 진

明知大學校 大學院

機械工學科

沈 哲 東

제어모드 변환을 통한
지능형 근력강화 시스템 개발

(Development of intelligent muscular
strength enhancement System
by control mode switching)

이 論文을 碩士學位 論文으로 提出함.

2008年 12月 日

明知大學校 大學院
機械工學科
沈 哲 東

沈 哲 東의 碩士學位 論文을 認准함.

主審委員 _____ 印

副審委員 _____ 印

副審委員 _____ 印

2008年 12月 日

明知大學校 大學院

목 차

Abstract	i
Nomenclature	ii
List of Tables	iii
List of Figures	iv
1. 소개	1
1.1 배경	1
1.2 개발내용	2
2. Hardware Design	5
2.1 기구부 설계	5
2.1.1 기구부 사양	5
2.2 Controller 설계	7
2.2.1 Controller MCU Atmega128	7
2.2.2 24bit Digital Pulse Counter LS7166	9
3. System Modeling	12
3.1 Control Input(FSR)	12
3.2 Load(Disturbance In SISO)	13
3.3 Amp(MD03)	15
3.4 Actuator(Motor&감속기)	18
3.4.1 DC Motor	18
3.4.2 감속기	24
3.4.3 Motor&감속기	26
3.4.4 Actuator 출력토크	29
3.5 Position Feedback	30
3.6 Control Algorithm	35
4. System Realization	41
4.1 Data Acquisition(DAQSys)	41
4.2 Total System 구성도	43
4.3 System 구현	44
5. 결론 및 고찰	47
5.1 최종 연구/개발 성과	47
5.2 결론	48
참고	50
1. 전달함수 Summing	50
2. 극점위치와 대응되는 임펄스응답 과정	52
참고문헌	53
국문초록	54
감사의 글	55

Abstract

Recently, As growing up Robot technology the concern about the development of wearable exoskeleton Robot have been increasing for directly giving a help to the human life. Therefore many exoskeleton robot using EMG signal form muscle was developed. If using that way, user's intention will be predictable. but to realize exoskeleton Robot, there is a following problem have to be solved. First, the complicated signal processing problem. Second, existing too many sensor data acquisition. Third, when using a EMG sensor, emerged a fault like different signal from sensor position, operating type, and attachment problem etc.

So in this paper the muscle power enhancement robot system reflecting user's intension is developed as a tracking control system as long as user can generate system input command. then the developed system will track system input command with a satisfied performance. The control input reflecting user's intension is made of the method to increase mechanical sensitivity at the sensor input part. The controller is designed by a system modeling.

The benefit of this kind of system would be where system design cost decreased and system can be constructed more easily. Also having a benefit to adaptable existing control method for our system. As a result, user's weak force would be amplified by the developed system. but It can assure operating performance on condition that the system component and total system would be built in a absolutely way.

So this thesis propose following design sequence to construct the muscle power enhancement robot as a system. Finally, To verify the fact that proposed system can give a help to the human's movement, effectiveness of the proposed system is confirmed by experiments.

Nomenclature

I_{Link}	: Link inertia from link center
I_{Load}	: Load inertia from load center
I_{MLink}	: Link inertia from motor center
I_{MLoad}	: Load inertia from motor center
Amp_g	: Amp gain
PWM_{value}	: Controller output voltage
FSR_{value}	: ADC value from force sensing register
Pos_{ref}	: ADC value equal to PWM value
K_P	: Proportional gain
K_I	: Integral gain
K_D	: Derivative gain
τ_a	: Amp time constant
K_t	: Motor torque constant
K_e	: Motor b.emf constant
τ_m	: Mechanical time constant
τ_e	: Electrical time constant
R_a	: Terminal resistance
L_a	: Terminal inductance
v_{IN}	: Input voltage
θ_m	: Rotor position
θ_L	: Link position
Ω_m	: Rotor velocity
J_m	: Rotor inertia
J_L	: Link inertia
B	: Rotor damping constant
B_L	: Harmonic drive damping constant
k	: Harmonic drive Joint stiffness constant

List of Table

Table 3.1 Motor property	18
Table 3.2 Encoder property	19
Table 3.3 Harmonic drive torque constant	24
Table 3.4 Relation between pwm and torque	30
Table 3.5 System parameter	30
Table 3.6 System cost	46

List of Figures

Fig 2.1 External appearance	5
Fig 2.2 Flexible Link Length	5
Fig 2.3 FSR input appearance	6
Fig 2.4 Angle limitation	6
Fig 2.5 Total mechanical appearance	7
Fig 2.6 Total electrical appearance	8
Fig 2.7 Pulse counter interface	9
Fig 2.8 LS7166 timming chart	10
Fig 2.9 FSR input part circuit	11
Fig 3.1 Input force vs Output voltage	12
Fig 3.2 FSR amplify by stress concentration	13
Fig 3.3 Simplified FSR input	13
Fig 3.4 Modeling of the load	14
Fig 3.5 Voltage amp appearance	15
Fig 3.6 Amp input vs Amp output	16
Fig 3.7 Amp delay	16
Fig 3.8 Amp response	17
Fig 3.9 Amp block diagram	17
Fig 3.10 Amp transfer function response	18
Fig 3.11 Block diagram of the motor	19
Fig 3.12 Block diagram of the simplified motor	19
Fig 3.13 Block diagram of the position feedback motor system	23
Fig 3.14 Compare real system and model system	23
Fig 3.15 Power transmission	24

Fig 3.16 Simplify power transmission	25
Fig 3.17 Block diagram of the power transmission	26
Fig 3.18 Block diagram of the actuator	26
Fig 3.19 Compare real system and model system	28
Fig 3.20 Torque vs Velocity	29
Fig 3.21 Block diagram of the position feedback total system	31
Fig 3.22 Compare real system and model system	31
Fig 3.23 When $K_p=6$ in P-control, system stability	33
Fig 3.24 When $K_p=10$ in P-control, system stability	33
Fig 3.25 When $K_p=6$, $K_d=0.5$ in PD-control, system stability	34
Fig 3.26 System operating concept	35
Fig 3.27 System operating algorithm	37
Fig 3.28 Block diagram of the mode switching system	37
Fig 3.29 Simulation result of the mode switching system	38
Fig 4.1 When input frequency changed, DAQ result	40
Fig 4.2 DAQSys algorithm	41
Fig 4.3 Virtual total exoskeleton System	42
Fig 4.4 Real total exoskeleton system configuration	43
Fig 4.5 System operating experiment by finger	44
Fig 4.6 System operating experiment by wrist	45

1. 소개

1.1 배경

현재 우리나라는 빠른 속도로 노인의 인구가 증가하고 있고, 이미 고령화 사회에 접어든 상태이다. 그에 따라 노인인구의 증가로 새로운 사회문제들이 생겨나고, 그러한 문제들을 해결하기 위한 실버산업이 새로운 시장으로 형성되는 추세이며, 앞으로도 계속 성장할 것으로 전망된다.

이러한 추세와는 달리 기술적인 취약성으로 인하여 실버산업의 발전에 많은 제약이 따르고 있다. EMG Sensor를 사용한 Exoskeleton의 경우 대부분 센서를 통한 제어입력생성에 초점을 맞추어 개발이 진행되고 있는 반면, System Control의 관점에 초점을 맞춘 개발 사례는 드문 설정이다. 따라서 본 논문에서는 Exoskeleton을 Control의 관점에서 System으로 구축하고 검증 및 적용을 위한 Total Solution을 제시한다.

이러한 관점에서의 Exoskeleton Robot의 연구개발은 고급 기술을 확보하는 가치 있는 작업으로 여겨지며, 실질적으로 노인문제 해결에 조금이나마 도움이 될 것으로 기대한다.

1.2 개발내용

1. 개발방향

일반적으로 Robot의 힘을 이용하여 인간에게 도움을 주는 Exoskeleton은 목적에 따라 크게 두 분야로 나뉘어 연구개발이 이루어지고 있다. 거동이 불편한 노인 및 장애인들에게 힘을 제공하여 활동을 가능하게 해주는 분야와 정상인에게 힘을 증폭시켜 주어 큰 힘을 필요로 하는 작업용 및 군사용으로써 작업을 수행할 수 있게 해주는 분야로 나뉜다.

힘-도움 기기로써 Exoskeleton은 사용자의 의도를 미리 예측하고 사용자의 실질적인 행동이 이루어지기 전에 사용자가 발휘하고자 힘을 제공하여 사용자는 실제 힘을 내지 않고도 원하는 행동을 수행할 수 있는 방법이다. 이러한 노인 및 장애인들의 사용을 위한 System은 제어입력을 확실하게 생성할 수 없는 상황에서 System을 동작시키기 위하여 사용자의 의도와 일치하는 입력소스를 만들어 내는 것이 중요하다. 대부분의 개발 결과물에서는 제어입력의 획들을 위하여 EMG Sensor를 사용하였는데, EMG sensor의 사용에는 다음과 같은 단점이 있다. 사용 시마다 센서응답이 다르고, 또한 부위에 따라서도 다르게 나타나게 되며, Sensor응답 Level이 낮고, 잡음에도 영향을 많이 받아 이를 위한

입력부에서의 처리과정이 복잡하다. 또 사용자가 바뀌게 될 경우 매번 System Operating을 위한 Calibration과정이 이루어져야 하며 사용자에게 부착되어야 하므로 탈부착상의 문제 또한 고려되어야 한다. 힘-도움 Exoskeleton을 위해 일반적으로 사용되는 방법에서 EMG센서는 사용자의 의도를 미리 예측할 수 있는 장점이 있는 반면 위와 같은 단점 또한 존재한다.

힘-증폭 기기로써 Exoskeleton은 사용자가 원하는 힘을 가하면 Exoskeleton은 사용자의 의도를 충실히 반영하여 원하는 행동을 수행할 수 있게 하는 방법으로 입력소스의 생성을 위해 힘-센서를 사용하여 사용자가 원하는 행동을 수행할 수 있게 하는 것이다. 이러한 System에서 사용자는 실질적인 힘을 발생시켜 제어입력을 생성할 수 있어야 하고, 또한 그에 맞는 충실한 제어가 수행되어져야 한다. 만약 상황에 맞는 정확한 System의 설계 및 제어가 이루어 지지 않으면 입력명령을 추종하지 못하게 되고, 이는 결국 사용자에게 원치 않는 힘을 작용시키는 결과를 초래할 수 있으며, 심지어 부상을 입힐 가능성까지 내포하고 있다.

각각의 방법에는 장단점이 있으므로 필요에 맞는 방법을 선정하고 개발하는 것이 중요하다. 전자는 System입력에 초점을 맞추어 미리 구동계획을 결정하고, 그에 따른 제어만을 실시하는 방법으로 사용자의 의도를 미리 파악할 수 있는 장점이 있는 반면 센서인터페이스가 복잡하고, 이에 따라 System을 개발하는데 많은 비용이 소모되는 단점이 있다. 이러한 고비용 System은 사용자에게 접근기회를 제한한다. 후자는 System Control에 초점을 맞추어 그때그때 들어오는 입력을 정확하게 추종하는 제어를 실시하는 방법으로 사용자의 움직임이 가능한 조건으로 인하여 물리적인 제어명령을 생성할 수 없는 사용자에게는 접근이 제한된다.

본 논문에서는 힘-증폭 기기에 적용되는 개념을 이용하여 힘-도움 기기를 개발하고자 한다. 즉, 제어입력 생성에는 힘-도움 기기에서 사용되는 방법과 유사하게 사용자의 움직임과 동기되어 FSR(Force Sensing Register)로부터 발생하는 Signal을 제어입력으로 생성한다. 제어과정은 힘-증폭 기기에서 사용되는 방법과 유사하게 System Control의 관점에서 각 제어구성요소를 Modeling하고, 실험데이터에 근거하여 System 요소의 타당성을 검증한 후 하나의 통합 시스템으로 구축하고 분석을 통하여 안정성을 확보한다. 따라서 System은 사용자의 움직임과 동기되어 발생하는 제어명령을 안정영역에서 잘 추종하도록 설계 및 제작하였다.

2. 개발목표

a. 개발비용 단축

개발비용을 단축하여 사용자에게 비용적인 부담을 덜어주는 것은 본 논문의 목적 중 하나이다. 따라서 제어알고리즘은 무료로 제공되는 개발환경을 이용하여 구축하였으며, Simulation Data를 획득하기 위한 소프트웨어인 Data Acquisition(DAQ)를 Microsoft Visual C++에서 제공하는 MFC를 이용하여 직접 개발함으로써 System 개발비용을 단축하였다. 또한 범용 MCU모듈인 Atmega128(On Chip Microprocessor) 및 Control관련 소자를 사용한 인터페이스 기술을 이용하여 Actuator부의 DC-Motor를 제어하기 위한 드라이버를 개발함으로써 개발비용을 절감하였다. 센서인터페이스 비용에서는 기존의 대부분의 개발 결과물에서 사용된 Motion Capture를 목적으로 사용된 고가의 EMG Sensor의 사용 대신 개발목적에 맞게 움직임이 가능한 사용자의 Force를 측정할 수 있는 FSR Sensor만을 사용함으로써 제어입력 생성부의 개발비용을 절감하였다.

b. System 확장 및 사용편의성 제공

간단한 버튼조작을 통하여 System의 구동모드를 변경할 수 있도록 하였고, LCD를 통하여 System의 상태를 display하여 사용 시 편의성을 제공하였다.

또한 다축의 Actuator로 System을 확장할 경우를 고려하여 SISO(Single Input Single Output) System으로 구동되는 모듈단위의 System을 구축하였다. 따라서 개발자가 Actuator를 추가하여 System 자유도를 확장할 경우 단순히 동일한 모듈간의 인터페이스만을 고려함으로써 System 자유도의 확장이 가능하도록 하였다.

3. 개발과정

Exoskeleton System의 개발은 각 과정을 구분하여 단계적으로 실시하며 도출된 결과를 통합하고 이를 분석 및 적용하는 절차에 의하여 실시한다.

a. 기구부 설계

b. 전장부 하드웨어 설계

c. System Component Modeling 및 타당성 검증

d. System Integration 및 타당성 검증

e. Model System의 분석 및 고찰을 통한 System 안정성 확보

f. 위치정보를 이용한 토크제어 알고리즘 개발

(엔코더이외의 추가적인 센서인터페이스가 필요 없는 구현의 간편성 확인)

g. System Modeling과정의 채택으로 인한 제어입력소스 생성의 수월함을 구동

실험을 통하여 검증

h. System을 이용한 사용자의 근력증강여부 검증

2. Hardware Design

2.1 기구부 설계

2.1.1 기구부 사양

1. 기구부 설계

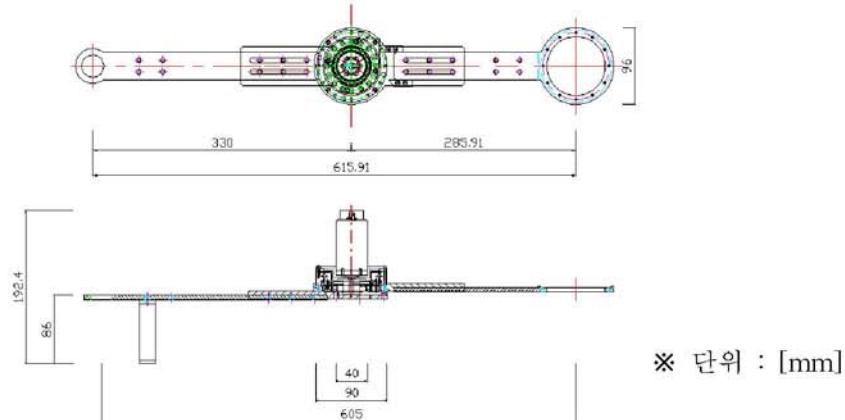


Fig 2.1 External appearance

재질은 큰 부하를 견뎌야 하고, 가벼워야 하므로 알루미늄 합금계열인 듀랄루민 7075의 재질을 사용하였다. 또한 큰 토크의 발생으로 인한 모터부에서의 발열을 고려하여 Motor부를 외부로 노출시켰다.

2. Flexible Link Length

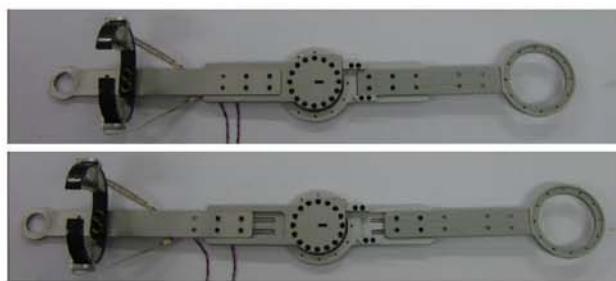


Fig 2.2 Flexible Link Length

링크의 길이는 일반적인 사람의 팔을 기준으로 결정하였고, 사용자마다 팔의 길이가 일정하지 않으므로 링크의 길이를 가변 할 수 있도록 설계였다. 또한

어깨부위와 손목부위의 링크를 동력전달부와 분리할 수 있게 설계하여 손목부위를 용도에 맞게 재설계함으로써 재사용이 가능하도록 하였다.

3. Control Input

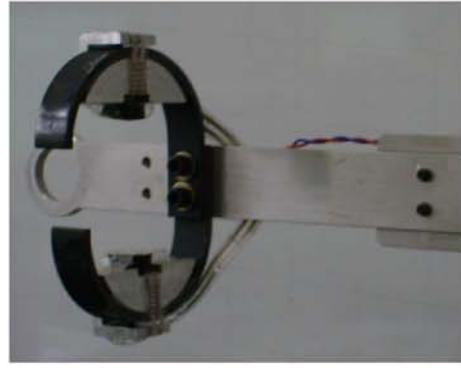


Fig 2.3 FSR input appearance

근육이 적어 근육으로 인한 탄성의 영향을 최대한 줄이기 위함 손목부위에 FSR을 위치시켜 사용자가 발휘하는 힘을 최대한 반영하도록 하였다. 또한 사용자가 적은 힘으로도 System을 Control하기 위한 입력소스를 확실하게 생성해 낼 수 있도록 응력집중을 고려하여 FSR에 입력되는 Force의 크기를 기계적으로 증폭시켰다.

4. Limitation of the Link Angle

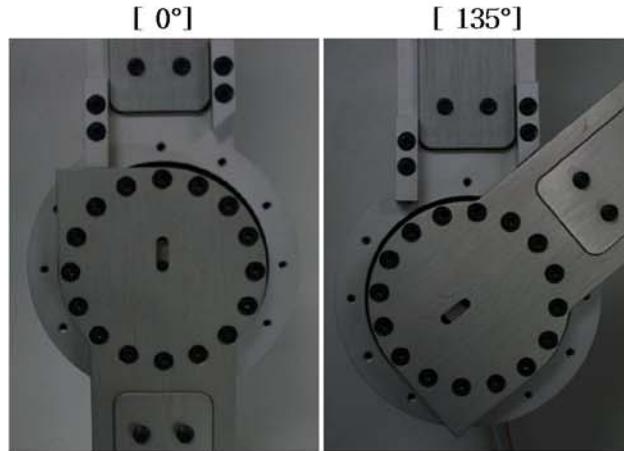


Fig 2.4 Angle limitation

사용자가 팔을 굽히지 않았을 때를 0° , 최대로 굽혔을 때의 회전각도를 135° 로 정의하고, 면접촉 Stopper를 고려함으로써 모터의 오동작에 의하여 링크가 정의된 각도범위를 이탈하였을 경우 기계적인 안정장치에 의하여 제한각도범위를

이탈하지 못하도록 함으로써 System을 사용하는 사용자의 안전을 고려하였다.

5. Total Appearance

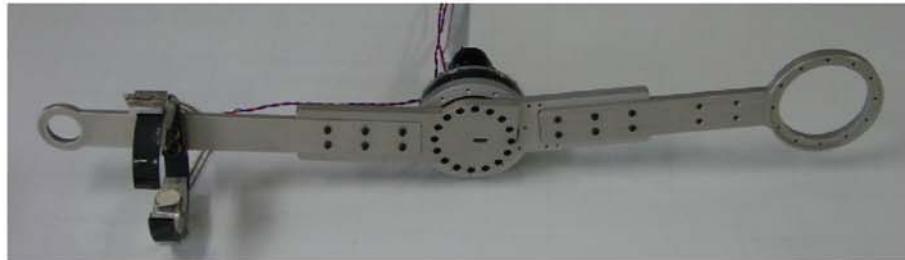


Fig 2.5 Total mechanical appearance

2.2 Controller 설계

2.2.1 Controller MCU Atmega128

1. MCU Specification

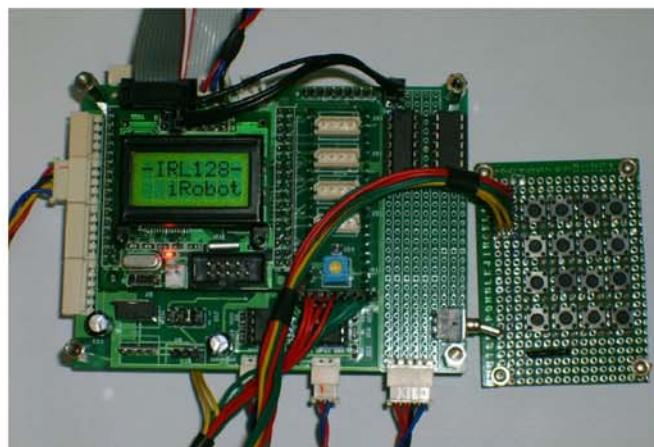


Fig 2.6 Total electrical appearance

a. Features

- High-performance, Low-power 8bit MicroController based on RISC
- Up to 16MIPS Throughput at 16MHz
- Operating Voltages : 4.5 ~ 5.5[V]
- Most Single Clock Cycle Execution
- 32개의 8bit 작업 register

- b. Communication Interface
 - 128K Bytes of In-System Reprogrammable Flash
 - SPI Interface for In-System Programming
 - Two-wire Serial Interface
 - Dual Programmable Serial USARTs
 - Master/Slave SPI Serial Interface
- c. Memory
 - 4K Bytes EEPROM
 - 4K Byte Internal SRAM
 - Up to 64K Bytes Optional External Memory Space
- d. System 구동
 - Two 8-bit Timer/Counters
 - Two Expanded 16bit Timer/Counters
 - 6 PWM Channels
- e. DAQ
 - 8-channel, 10-bit ADC

2. 개발 된 Controller의 주요기능

- a. Communication

2ch.의 Serial통신 중 1ch.은 MCU의 Flash Memory에 Program을 programming하기 위하여 사용하였고, 나머지 1ch.은 엔코더펄스 데이터를 PC로 받아들여 System Response를 확인하기 위하여 사용하였다.
- b. Control Signal In/Out

모터를 구동하기 위한 신호로 PWM을 이용하였고, 피드백을 위한 모터의 위치정보를 얻기 위하여 전용 엔코더펄스 카운터를 사용하였다.
- c. External Interrupt을 이용한 소프트웨어 안전장치

Atmega128에서 External Interrupt 중 INT[0]~INT[5]는 I2C, Serial Communication, PWM3와 port를 공유하므로 이를 제외한 INT[6]~INT[7]을 사용하여 사람의 팔이 움직일 수 있는 회전각도에 해당하는 위치에 Limit Switch를 부착하고, 이 스위치가 눌렸을 때 외부인터럽트가 발생되게 한다. 외부인터럽트의 우선순위는 System에 구동하는데 사용되는 모든 ISR중 최상위에 해당되므로 System은 진행 중인 Task를 중지하고 해당 인터럽트 서비스 루틴으로 들어가게 된다. 이 때 External ISR은 System의 진행 중인 모든 작업을 중지시키고, System을 Reset시켜 하드웨어뿐만 아니라 소프트웨어에서도

링크가 동작하는 범위를 제한하는 안전장치를 설계함으로써 사용자의 안전을 최대한 고려하였다.

2.2.2 24bit Digital Pulse Counter – LS7166

1. Specification

a. Feature

- DC to 25MHz Count Frequency
- 8-bit I/O Bus for Microprocessor Communication and Control.
- $\times 1$ or $\times 2$ or $\times 4$ 의 체배 기능
- Operation Voltage : 3.3~5.5[V]

※ System의 Actuator부에서 선정된 Motor가 Max 8000[rpm]으로 구동할 때 발생되는 4재배기능을 사용한 엔코더의 동작 주파수는 약 1.2[MHz]이므로 LS7166과 같은 고성능의 Pulse Counter의 사용은 적절하다.

b. Pin Connection

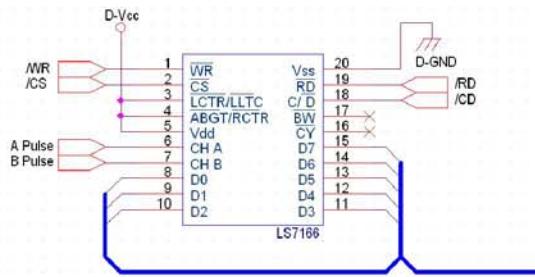


Fig 2.7 Pulse counter interface

2. 장점

a. 편의성

$0^\circ \sim 180^\circ$ 이내의 링크구동 시 엔코더로부터 출력되는 펄스카운트 정보를 24bit 내부레지스터에 저장함으로써 Data Size문제로 발생하는 Overflow현상문제를 배제할 수 있고, 디지털방식으로 Motor의 위치정보를 소자 내부레지스터에 저장함으로써 MCU는 단지 내부레지스터에 저장된 카운트 정보를 읽어와 사용하기만 하면 된다. 이러한 편리함으로 Motion Control Applications에 유용하게 사용될 수 있다.

b. 다양성

내부 Control Register의 setting으로 다른 기능의 동작모드로 설정하여 사용이 가능하다.

c. 유용성

간단한 Interface만을 통한 펄스카운트 소자를 사용함으로써 MCU 자원을 사용하지 않게 되고, 따라서 내부자원사용을 줄임으로써 System은 그만큼의 부하를 줄인 상태에서 동작할 수 있게 된다.

3. Operation

※ 다음은 펄스카운터 소자가 동작하기 위한 Timming Chart로 데이터 시트에 첨부되어 있는 소스코드를 이용하여 각 Signal을 생성하였다. 다음의 Timming에 의하여 각 Signal을 만들어 주어야 엔코더펄스정보를 Controller가 가져와 피드백데이터로 사용할 수가 있다.

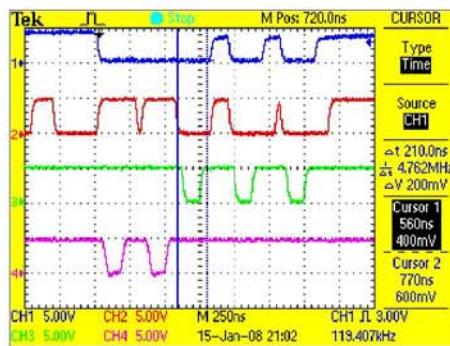


Fig 2.8 LS7166 timming chart

- ※ 노랑색(1) : Chip Select
- 파랑색(2) : Control/Data Select,
- 보라색(3) : Encoder Pulse Read from data register,
- 연두색(4) : Write to Control register of the LS7166

a. 3-State buffer

1번 signal은 3state buffer에 의하여 동작되는 소자인 LS7166을 어드레스 버스정보를 이용하여 Active 상태로 만들어 펄스카운터 소자가 동작할 수 있게 만들어 놓은 상태이다.

b. LS7166 Control/Data Register Set

2번 signal은 소자의 동작모드 및 내부 레지스터 등의 기능을 설정하거나 테이터레지스터에 들어있는 펄스정보를 읽기위한 Setting signal로써 처음에는 High상태를 유지하고 있어 Control Register를 선택하고, 그 다음 Low상태를 유지하여 Data Register를 선택하였다.

c. Control Mode Set

2번 signal이 High상태로 되어 Control Register를 Select하고 있는 동안 데이터버스상에 4번 signal과 같은 제어정보를 보내면 LS7166은 MCU의 Write

Pulse 발생 시 이 정보를 받아 내부 Control Register를 Setting하여 동작환경을 설정한다.

d. Data Read

2번 signal이 Low상태로 되어 Data Register를 Select하면 LS7166의 데이터레지스터에 저장되어 있는 엔코더펄스정보를 MCU의 Read Pulse 발생 시 데이터버스를 통하여 MCU의 레지스터로 읽어올 수가 있다.

2.2.3 FSR Input

1. 제어입력신호생성

센서응답이 양호하여 증폭 후 1차 필터(Lowpass Filter)를 통과시켜 AD Conversion하는 간단한 절차에 의하여 제어입력신호를 생성하였다.

2. Circuit part

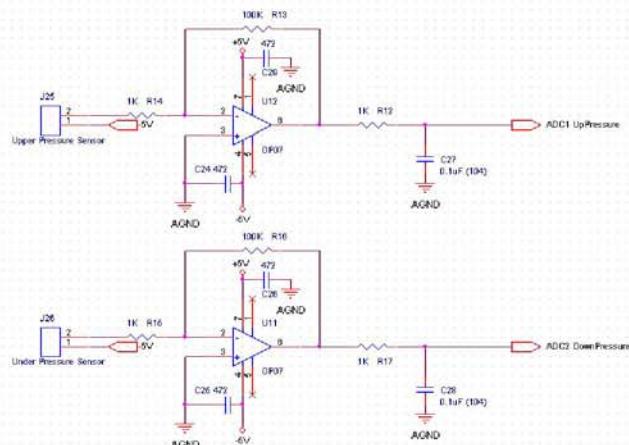


Fig 2.9 FSR input part circuit

$$\text{Input gain} : \frac{V_{out}}{V_{in}} = -\frac{R_2}{R_1} = -\frac{100[k\Omega]}{1[k\Omega]} = -100$$

$$\text{Cutoff frequency} : f_c = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi \times 1000 \times 0.1e^{-6}} \approx 15.9[kHz]$$

(단, f_c : 차단주파수[Hz], R : 저항[Ω], C : 커패시턴스[F])

3. System Modeling

3.1 Control Input(FSR)

1. Specification on datasheet

a. Response Time

datasheet상의 Typical Performance를 참고하면 Impulse 하중을 FSR에 가했을 때 오실로스코프를 통하여 측정되는 Rising time은 20[us]미만으로 Control Load가 큰 System에서 이러한 입력지연은 무시할 만한 수치이다.

b. 선형성

- Linearity(Error) : 5% 미만
- Repeatability : $\pm 2.5\%$ 미만
- Hysteresis : 4.5% 미만

c. Input Force vs Output Voltage (from datasheet)

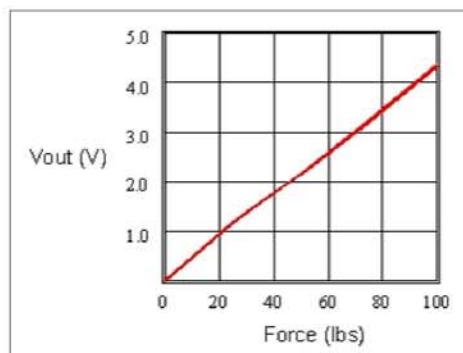


Fig 3.1 Input force vs Output voltage

2. 응력집중

실험결과로부터 알 수 있듯이 손가락으로 FSR에 힘을 가했음에도 불구하고 10[bit] ADC에서 200이하의 ADC된 FSR값이 출력되는 것을 알 수 있다. 따라서 손목힘에 의한 FSR값을 생성할 때에는 손목 부위와 FSR 입력부위 사이에 응력이 집중되는 기구를 추가함으로써 작은 힘으로도 원하는 범위의 FSR값을 생성시킬 수 있도록 하였다. 이 때 증폭되는 입력값의 범위를 Max 400의 ADC 값이 되도록 응력집중을 설정한다.

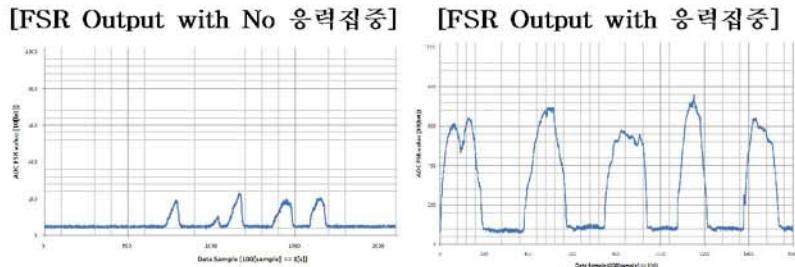


Fig 3.2 FSR amplify by stress concentration

같은 힘을 주었을 때 응력집중을 고려함으로써 3배정도의 큰 값을 얻을 수 있었다.

3. Input Source

1[Hz]에 해당하는 사람의 걸음걸이는 일반적으로 빠른 걸음에 해당한다. 따라서 걸음걸이와 동기되어 움직이는 팔을 고려해 볼 때 사람팔의 회전주기는 1[s]이상이라고 볼 수 있다. 따라서 위의 실험결과와 비교하여 다음과 같이 FSR에 의한 입력소스를 1[s]의 주기를 갖는 sine파로 정의한다.

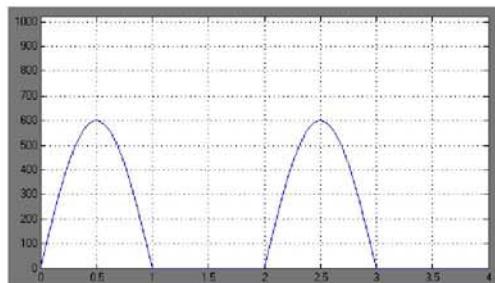


Fig 3.3 Simplified FSR input

3.2 Load(Disturbance In SISO)

1. Load Constant

a. Link weight

- Wrist Short Link + Wrist Long Link + Volt = 0.382[kg]
- 서포터1개 = 0.176[kg]
- 봉 = 1.249[kg]
- 봉고정판1개 = 0.353[kg]

- b. Link length
 - 모터 센터 ~ 서포터 = 0.24[m]
 - 모터 센터 ~ 봉 = 0.33[m]
- c. Load weight
 - 원판모양의 질량 = 5 ~ 10[kg]

2. Modeling

a. Simplify

링크관성은 System에 미치는 영향이 작다고 가정하여 봉모양으로 단순화하고, System에 가해지는 부하는 봉의 끝단에 달려있는 질량이 균일한 원통모양으로 단순화 한다. 따라서 실험을 위해, 서포터를 포함한 링크는 질량이 0.734[kg]이고 길이가 0.33[m]인 봉으로, 부하는 10[kg]고 반지름이 0.1[m]인 원판모양으로 정의한다.

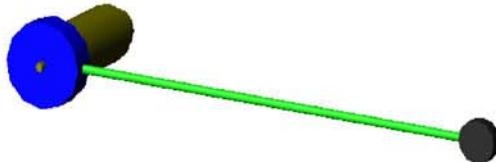


Fig 3.4 Modeling of the load

※ I_{Link} : 링크 중심에서 링크의 관성모멘트

I_{Load} : 로드 중심에서 로드의 관성모멘트

I_{MLink} : 모터 센터축에서 본 링크의 관성모멘트

I_{MLoad} : 모터 센터축에서 본 로드의 관성모멘트

b. 링크 관성모멘트

$$I_{Link} = \frac{1}{12} m l^2 = \frac{1}{12} \cdot 0.734 \cdot 0.33^2$$

$$= 0.00666105$$

$$I_{MLink} = I_{Link} + m d^2 = \frac{1}{12} m l^2 + m l^2$$

$$= 0.00666105 + 0.734 \cdot (0.33/2)^2$$

$$= 0.0266442 [kg \cdot m^2]$$

c. 부하 관성모멘트

$$I_{Load} = \frac{1}{2}MR^2 = \frac{1}{2} \cdot 5 \cdot 0.1^2$$

$$= 0.025$$

$$I_{MLoad} = I_{Load} + Md^2 = \frac{1}{2}MR^2 + Ml^2$$

$$= 0.025 + 5 \cdot 0.33^2$$

$$= 0.5695 [kg \cdot m^2]$$

부하질량의 관성모멘트는 링크질량의 관성모멘트의 약 20배에 해당함을 알 수 있다. 따라서 링크질량의 관성모멘트에 대한 영향은 크지 않음을 예상할 수 있으므로 링크질량의 관성영향은 무시하기로 한다.

3.3 Amp(MD03)

1. MD03-50[V], 20[A] H-bridge Motor Driver

a. appearance

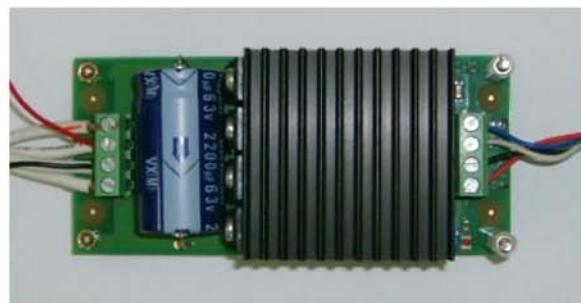


Fig 3.5 Voltage amp appearance

b. Specification

- 5[V] supply control logic, Maximum 50[mA] required
- Input Motor Voltage Range : 5~50[V]
- Input PWM frequency : 20[kHz] or greater

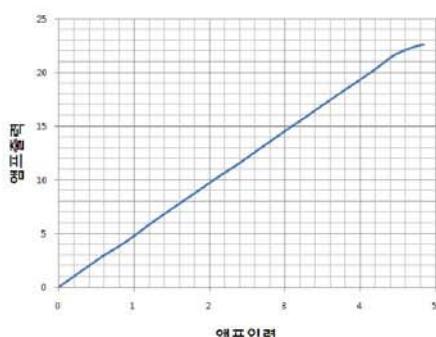
2. Amp Gain

MCU의 전원이 약4.84[V]이므로 1023[pwm]을 입력으로 주었을 때의 출력전

압은 4.84[V]가 된다.

또한 모터 및 감속기의 수명을 고려하여 모터구동속도를 6000[rpm]이하로 제한할 때, 모터단자에 인가되는 전압은 20[V]이하이므로 그래프에서 나타나는 20[V]이상의 비선형구간은 고려대상에서 제외한다.

pwm 输出	엠프 输入	엠프 输出	엠프 계인
설정수	상위	하위	
0	0	0	0
63	0	63	0.30 1.51 5.07
126	0	126	0.60 2.93 4.92
189	0	189	0.89 4.26 4.77
252	0	252	1.19 5.78 4.85
315	1	60	1.49 7.24 4.86
378	1	123	1.79 8.67 4.85
441	1	186	2.09 10.1 4.84
504	1	249	2.38 11.5 4.82
567	2	57	2.68 12.98 4.84
630	2	120	2.98 14.42 4.84
693	2	183	3.28 15.83 4.83
756	2	246	3.58 17.27 4.83
819	3	54	3.87 18.74 4.84
882	3	117	4.17 20.2 4.84
945	3	180	4.47 21.7 4.85
1008	3	243	4.77 22.5 4.72
1023	3	255	4.84 22.6 4.67



$$slope = \frac{Analog\ Output\ [V]}{Analog\ Input\ [V]} = 4.84$$

Fig 3.6 Amp input vs Amp output

3. Amp Delay

엠프출력전압이 모터에 인가되는 전압이므로 엠프입력에 대한 엠프출력지연이 있을 경우, 모터응답 자체는 빠르더라도 Controller의 pwm출력에 대한 모터의 응답은 엠프지연의 영향을 받게 된다. 따라서 엠프응답지연은 시스템응답지연에 영향을 미치는 요소로 고려되어야 한다. 실험결과 Step Input을 엠프에 가한 후 약40[ms]이후에 응답을 나타내기 시작하는데 디지털방식에 의하여 동작하는 엠프내부적인 연산시간에 의한 응답지연으로 판단된다.

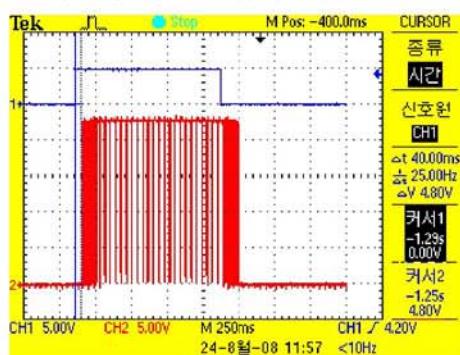


Fig 3.7 Amp delay

4. Amp Response

pwm width의 변동이 많은 과도응답을 지나 정상상태까지 도달하는데 대략 120[ms]정도의 시간지연이 있으므로 시상수를 대략 70[ms]로 가정한다.

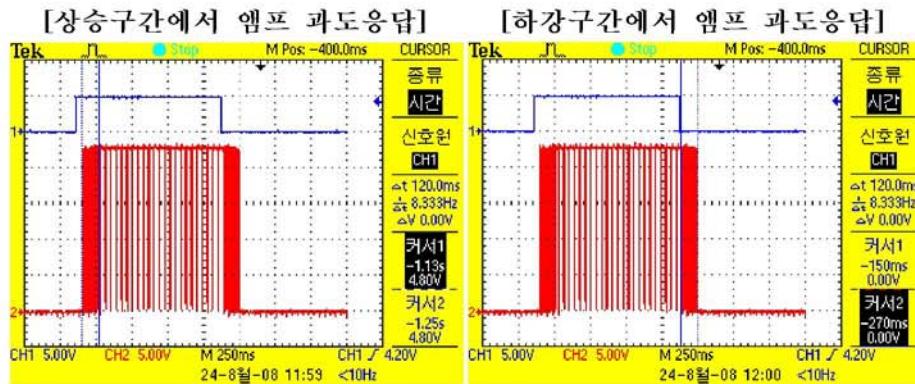


Fig 3.8 Amp response

5. Amp Transfer Function

a. Block diagram

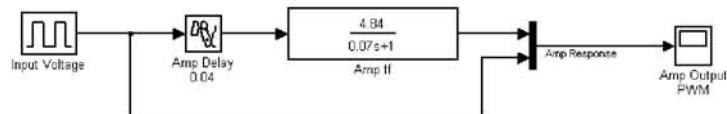


Fig 3.9 Amp block diagram

※ $gain = 4.84$

$$\tau_a = 4 [ms] = 0.04 [s]$$

$$\therefore Amp(s) = \frac{4.84}{0.07s + 1} e^{-0.04s}$$

b. Amp Transfer Function Response by Simulink

시스템 해석의 용이성을 위해 시상수를 크게 설정하여 앰프전달함수의 지연요소를 제거하는 방법으로 앰프전달함수를 단순화 시킨다. 즉, 실제 40[ms]의 응답지연 후 70[ms]의 시상수를 가지므로 응답지연이 없는 110[ms]의 시상수를 갖는 앰프전달함수로 단순화 시킨다.

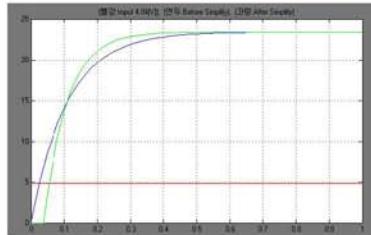


Fig 3.10 Amp transfer function response

6. 결론

제어기로부터 출력된 신호가 앰프를 거쳐 Plant로 입력되므로 실제 제어신호를 만들어주는 앰프의 응답성을 확인하는 과정은 모델링 과정에서 반드시 수행되어져야 하는 과정이다. 또한 제어신호가 앰프를 거쳐 증폭이 되는 동안 약 0.1[s]의 응답지연을 실험결과로부터 확인할 수 있었는데 이러한 다소 오랜 시간의 응답지연 결과는 앰프전달함수를 Total System 전달함수에 추가시켜야 하는 타당성을 제공한다.

3.4 Actuator(Motor&감속기)

3.4.1 DC Motor

1. Motor Constants

Maxon-Ø40mm, Brushes, 150Watt	
assigned power rating	150[W]
nominal voltage	24[V]
speed/torque gradient	3.32[rpm/mNm]
starting current	75.9[A]
max permissible speed	8200[rpm]
max continuous current	6[A]
max continuous torque	181[mNm]
max efficiency	91%
torque constant (Kt)	30.2[mNm/A]
speed constant (Ke)	317[rpm/V] -> 1/317[V/rpm]
mechanical time constant (Tm)	5[ms]
electrical time constant (Te)	La/Ra = 0.00025
rotor inertia (Jm)	0.0000134[Kg-m^2]
terminal resistance (Ra)	0.316[ohm]
terminal inductance (La)	0.08[mH]
weight of motor	480[g]

Table 3.1 Motor property

시정수가 작으면 System은 넓은 밴드폭을 가지며 스텝입력에 대하여 빠른 전류응답을 가질 것이다. 또한 $\tau_e \approx 0$ 일 경우 모터의 코일성분은 거의 사라지게 되어 무시할 수 있다.

2. Encoder

Counts per turn	1024[pulse]
max operating frequency	320[kHz]

Table 3.2 Encoder property

a. 엔코더 동작 주파수

만약 엔코더로부터 발생하는 펄스주기가 카운터가 읽을 수 있는 주기보다 짧을 경우 카운터는 엔코더펄스를 카운트 하지 못하게 된다. 따라서 카운터는 엔코더의 동작주파수에 따라 결정되므로 이에 대한 고려가 필요하다.

b. 1회전당 엔코더 펄스수

엔코더로부터 1회전당 발생하는 펄스는 1024[pulse]이다. 개발 System은 디지털방식의 카운터소자를 이용하여 4제배 모드를 사용함으로써 1회전당 엔코더로부터 발생되는 펄스는 4096[pulse]로 이 정보를 피드백데이터로 사용할 수 있게 된다.

3. Block Diagram for a DC Motor System

a. Block Diagram

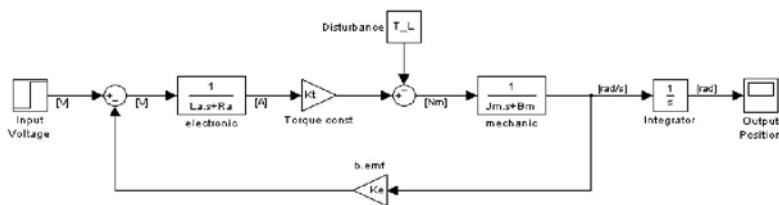


Fig 3.11 Block diagram of the motor

b. 미분방정식

$$\begin{cases} v_{IN} = L \frac{di}{dt} + Ri + K_E \dot{\theta} \\ T_{IN} = J\ddot{\theta} + B_m \dot{\theta} + T_L \\ T_{IN} = K_t i \end{cases}$$

c. Transfer Function

$$\begin{cases} (Ls + R)I = V - K_E s \Theta_m \\ (J_m s^2 + B_m s) \Theta_m = K_t I - T_L \end{cases}$$

$$\therefore I = \frac{V - K_E s \Theta_m}{Ls + R} = \frac{\frac{V}{R} - (\frac{K_E}{R} \Theta_m)s}{\frac{L}{R}s + 1}$$

※ 전기방정식으로부터 구한 전류출력을 기계방정식의 전류항에 대입하여 전류항을 소거하면 입력전압에 따른 출력각도를 나타내는 모터전달함수를 구할 수 있다.

$$(J_m s^2 + B_m s) \Theta_m = K_t \frac{V - K_E s \Theta_m}{Ls + R} - T_L$$

$$(J_m s^2 + B_m s) \Theta_m + \frac{K_t K_E s}{Ls + R} \Theta_m = \frac{K_t}{Ls + R} V - T_L$$

$$\left\{ J_m s^2 + B_m s + \frac{K_t K_E s}{Ls + R} \right\} \Theta_m = \frac{K_t}{Ls + R} V - T_L$$

$$\left\{ \frac{(J_m s^2 + B_m s)(Ls + R) + K_t K_E s}{Ls + R} \right\} \Theta_m = \frac{K_t V - (Ls + R) T_L}{Ls + R}$$

$$\{(J_m s^2 + B_m s)(Ls + R) + K_t K_E s\} \Theta_m = K_t V - (Ls + R) T_L$$

$$\therefore \begin{cases} \Theta_m = \frac{K_t}{s\{(J_m s + B_m)(Ls + R) + K_t K_E\}} V \\ \quad - \frac{Ls + R}{s\{(J_m s + B_m)(Ls + R) + K_t K_E\}} T_L \end{cases}$$

$$\begin{cases} \Omega_m = \frac{K_t}{(J_m s + B_m)(Ls + R) + K_t K_E} V \\ \quad - \frac{Ls + R}{(J_m s + B_m)(Ls + R) + K_t K_E} T_L \end{cases}$$

4. 근사화를 통한 입력전압에 따른 모터 출력각속도 전달함수

a. 개념

대부분의 Motor System에서 전기적시상수 $\frac{L}{R}$ 은 기계적시상수 $\frac{J}{B}$ 보다 훨씬

작으므로 전기적 시상수를 무시하는 방법으로 System 차수를 줄여 단순화를 실시한다.

b. $\tau_m \text{ VS } \tau_e$

$$- \tau_m = \frac{J}{B} = \frac{J}{K_E K_t} = 5 [ms] = 0.005 [s]$$

$$- \tau_e = \frac{L}{R} = 250 [us] = 0.00025 [s]$$

$$\Rightarrow \tau_m \approx 20 \tau_e \text{이므로 전기적 시상수는 무시한다. } (\tau_e = \frac{L}{R} \approx 0)$$

c. Simplify

보통 실제 모터의 전달함수를 확인하기 위해서는 속도응답을 확인하므로 입력 전압에 따른 속도응답을 나타내는 전달함수를 모델링 한다. 이 때 외란은 0이라 하고, 위에서 구한 입력전압에 따른 출력각속도를 나타내는 전달함수에서 문자와 분모를 각각 L과 J로 나누면 다음과 같은 방법으로 전달함수를 단순화 할 수 있다.

$$\Omega_m = \frac{K_t}{J_m s (Ls + R) + K_t K_E} V$$

$$\Omega_m = \frac{K_t}{J_m L s^2 + J_m R s + K_t K_E} V = \frac{\frac{K_t}{J_m L}}{s^2 + \frac{R}{L} s + \frac{K_t K_E}{J_m L}} V$$

또한 $\frac{R}{L} \gg \frac{K_t K_E}{J_m R}$ 일 경우 모터전달함수의 특성방정식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\Delta = (s + \frac{R}{L})(s + \frac{K_t K_E}{J_m R}) = s^2 + (\frac{R}{L} + \frac{K_t K_E}{J_m R})s + \frac{K_t K_E}{J_m L}$$

$$= (s + \frac{1}{\tau_e})(s + \frac{1}{\tau_m})$$

$$(\tau_e = \frac{L}{R}, \tau_m = \frac{J_m R}{K_t K_E})$$

일반적으로 moving part의 inertia가 큰 경우 $\tau_m \gg \tau_e$ 이므로, 이러한 경우 보통 전기적인 시상수를 무시하고 1차 시스템으로 근사하여 기계적인 시상수만을 고려하여 다음과 같은 단순화 된 모터전달함수를 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}
\Omega_m &= \frac{\frac{K_t}{J_m L}}{(s + \frac{1}{\tau_e})(s + \frac{1}{\tau_m})} V = \frac{\frac{K_t \tau_e}{J_m L}}{(\tau_e s + 1)(s + \frac{1}{\tau_m})} V \\
&= \frac{\frac{K_t}{J_m L} \cdot \frac{L}{R}}{(\tau_e s + 1)(s + \frac{1}{\tau_m})} V = \frac{\frac{K_t}{J_m R}}{(s + \frac{1}{\tau_m})} V \quad (\because \tau_e \approx 0) \\
\therefore \Omega_m &= \frac{\frac{K_t / R}{J_m s + \frac{J_m}{\tau_m}} V}{=} \\
&= \frac{K_t}{R} \cdot \frac{1}{J_m s + \frac{J_m}{\tau_m}} V \\
&= \frac{K_t}{R} \cdot \frac{1}{J_m s + \frac{K_t K_E}{R}} V
\end{aligned}$$

d. Simplified Motor System block diagram

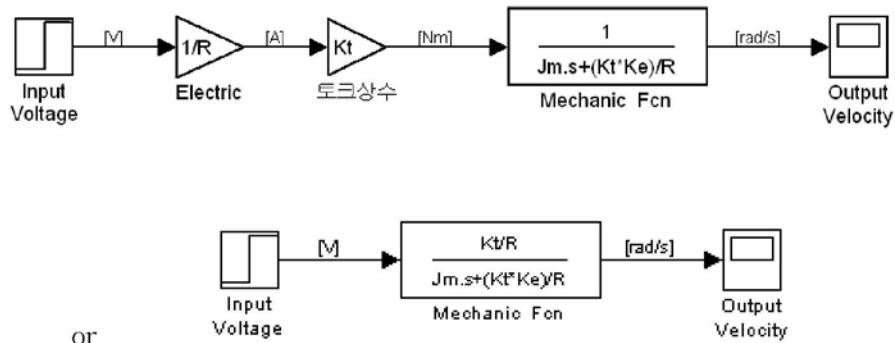


Fig 3.12 Block diagram of the simplified motor

5. Motor Transfer Function

a. Motor Modeling Block Diagram

앰프전달함수와 모터전달함수에 PID Controller를 적용시켜 궤환시스템을 구성하여 단순화 된 모터전달함수의 정도를 확인한다. 이와 같이 감속기 및 링크 등의 기타 요소들을 제외한 상태에서 모터자체만을 고려하게 되면 실제 구현 및 응답파형의 확인에 용이하게 되므로 모터 궤환시스템을 다음과 같이 구성하

였다.

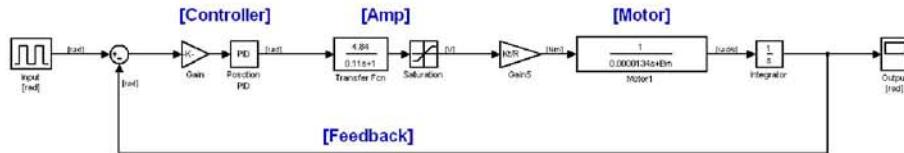


Fig 3.13 Block diagram of the position feedback motor system

b. When Step(90°) Response, Compare Real System & Model System ($K_p=1$, $K_d=0$, $B_m=0.0019$)

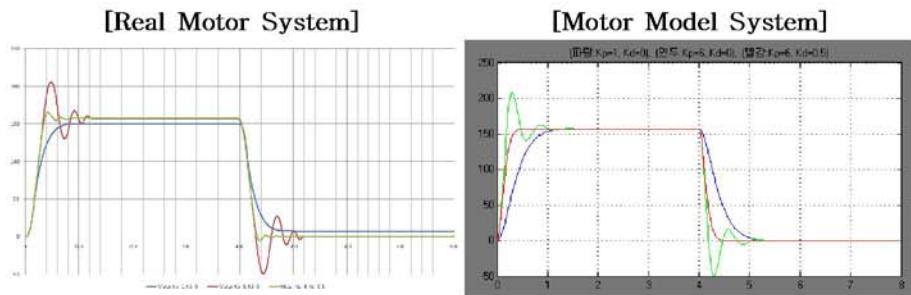


Fig 3.14 Compare real system and model system

Model System에서 응답이 다소 빠르게 나타났는데 이는 앰프전달함수를 단순화하는 과정에서 응답지연을 제거함에 원인이 있다고 판단된다. 이러한 응답 시간의 오차는 System이 동작하는 주기에 비하여 짧은 시간이라고 판단한다. 또한 실제 모터 모델링과정에서 정의된 감쇄요소 B_m 값과 엔코더를 통한 실제 모터응답 결과와 매칭을 위해 조절한 B_m 값 간에 약간의 오차가 있음을 확인하였는데 모터 constant관련 오차에 원인이 있다고 판단된다.

이러한 이유로 인하여 System을 완벽하게 모델링하는 테이는 한계가 있으므로, 모델링 된 시스템으로부터 각각의 개인셋팅에 따른 응답추세를 확인하고 어느 정도 만족할만한 안정영역에서 System이 구동될 수 있는지 여부를 판단한다.

c. 결론

Motor System을 PID Controller를 적용한 케환시스템으로 구성하여 실제 모터로부터 나오는 엔코더펄스 신호를 이용한 모터응답과, 모델링된 모터전달함수를 이용한 모터응답실험을 통하여 약간의 모터감쇄요소의 수정과 응답시간의 단축이 있음을 감안하면 어느 정도 Motor System의 모델링이 이루어 졌다고 결론내릴 수 있다.

3.4.2 감속기

1. 동력전달 과정을 통한 Joint Flexibility

a. 동력전달 원리

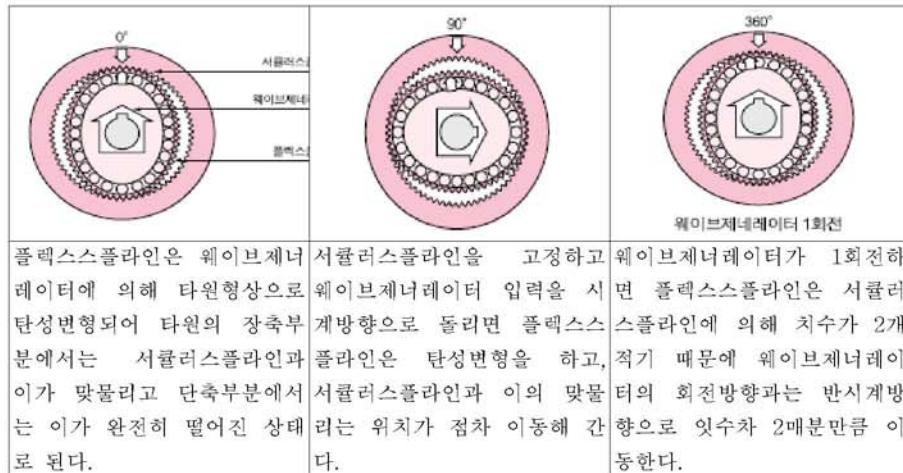


Fig 3.15 Power transmission

b. 필요성

서보시스템에 있어 구동계의 강성이나 백래쉬는 시스템 성능에 큰 영향을 주는 요소로 설계 시 이를 항목에 대한 상세한 검토가 필요하다. 따라서 Motor Shaft에서 감속기를 통하여 부하로 동력이 전달되는 과정에서 Flexspline의 변형이 일어나야 하므로 동력전달 시 토크강성을 고려해야 한다.

c. 하모닉드라이브 강성 (스프링상수)

토크[Nm]	0 ~ 7	7 ~ 25	25 ~
비틀림각[rad]	0 ~ 0.00044	0.00044 ~ 0.00113	0.00113 ~
스프링상수[Nm/rad]	16000	25000	29000

Table 3.3 Harmonic drive torque constant

2. Modeling

a. Simplify

모터 및 모터와 관여된 댐핑요소와 동력을 전달하는 하모닉드라이브의 강성요소 및 부하측의 관성 및 부하와 관여된 댐핑요소를 고려하면 다음과 같이 단순화를 실시할 수 있다.

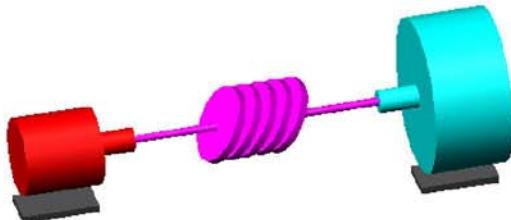


Fig 3.16 Simplify power transmission

b. 미분방정식

$$\begin{cases} J_L \ddot{\theta}_L + B_L \dot{\theta}_L + k(\theta_L - \theta_m) = 0 \\ J_m \ddot{\theta}_m + B_L \dot{\theta}_m + k(\theta_L - \theta_m) = u \end{cases}$$

(u : 입력 토크

$$B : B_m + \frac{K_t K_E}{R}$$

k : Joint stiffness constant)

c. Transfer Function

$$\begin{cases} (J_L s^2 + B_L s + k) \Theta_L - k \Theta_m = 0 \\ (J_m s^2 + B s + k) \Theta_m - k \Theta_L = U \end{cases}$$

$$\begin{cases} \Theta_m = \frac{J_L s^2 + B_L s + k}{k} \Theta_L \\ (J_m s^2 + B s + k) \Theta_m - k \Theta_L = U \end{cases}$$

위의 식을 하나로 합치면 다음의 전달함수를 얻을 수 있다.

$$\frac{(J_m s^2 + B s + k)(J_L s^2 + B_L s + k) - k^2}{k} \Theta_L = U$$

$$\therefore \frac{\Theta_L}{U} = \frac{k}{(J_m s^2 + B s + k)(J_L s^2 + B_L s + k) - k^2} = \frac{k}{P_m(s) \cdot P_L(s) - k^2}$$

3. Open-Loop Block Diagram

모터 및 감속기의 분모항을 $P_m(s)$ 및 $P_L(s)$ 라 정의 하면 다음과 같은 Open-Loop Block Diagram을 구성할 수 있다.

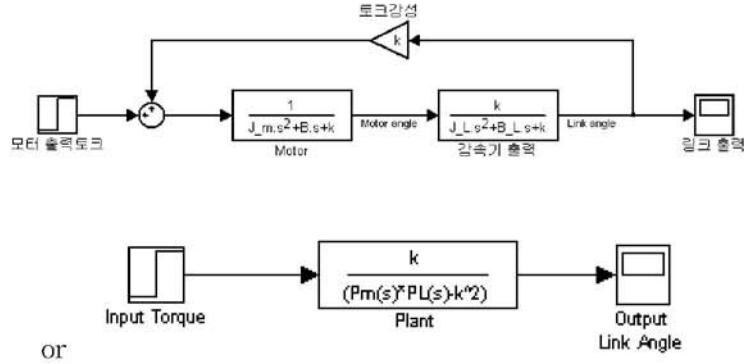


Fig 3.17 Block diagram of the power transmission

3.4.3 Motor & 감속기

1. Total Actuator Model

a. System parameter - Damping Constant

Motor측의 전달함수를 고려할 때 전압앰프를 사용함으로써 b.emf전압을 고려해야 하는데, 이러한 b.emf전압은 댐핑요소로 작용하므로 Motor측의 전달함수에서 댐핑요인은 고려되어야 한다.

b. Motor&감속기 Block Diagram

입력전압에 따른 출력각도를 나타내는 모터전달함수와 입력토크에 따른 출력각도를 나타내는 감속기전달함수를 모두 포함한 Open-Loop Actuator 전달함수는 다음과 같다.

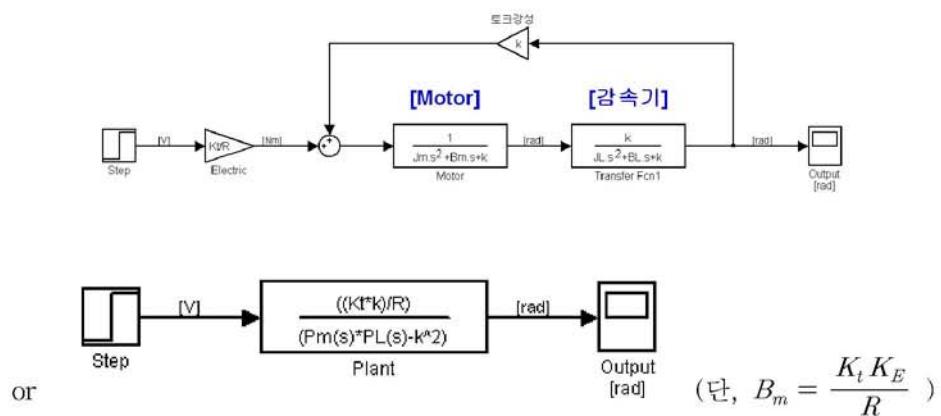


Fig 3.18 Block diagram of the actuator

c. Transfer Function

$$\begin{aligned}
 \frac{Y}{V} &= \frac{K_t}{R} \times \frac{\frac{k}{(J_m s^2 + B_m s + k)(J_L s^2 + B_L s + k)}}{1 - \frac{k^2}{(J_m s^2 + B_m s + k)(J_L s^2 + B_L s + k)}} \\
 &= \frac{K_t}{R} \times \frac{\frac{(J_m s^2 + B_m s + k)(J_L s^2 + B_L s + k)}{k}}{(J_m s^2 + B_m s + k)(J_L s^2 + B_L s + k) - k^2} \\
 \therefore \frac{Y}{V} &= \frac{K_t}{R} \times \frac{k}{(J_m s^2 + B_m s + k)(J_L s^2 + B_L s + k) - k^2}
 \end{aligned}$$

2. 감속기 댐핑요소

a. 감속기 댐핑요소 고려배경

구현된 System 출력과 모델링 된 System의 출력을 비교하는 과정에서 Model System이 오버슛이 크게 나타나고, 진동현상도 더 발생하는 것으로 나와서 이런 영향을 줄여 실제 Real System의 출력결과와 매칭을 시키기 위하여 감속기의 댐핑효과를 고려한다.

감속기 관성 $B_L = 0.001$ 를 Model System에 추가시켰다. 이렇게 추가시킨 감쇄요소는 감속기에 삽입한 SK-1A 구리스의 영향인 것으로 판단된다.

b. Experiment

실험은 Motor System과 Motor&감속기 System의 출력을 비교하면서 실시하였다. 첫 열, 3개의 Fig.는 개인을 다르게 했을 때 Motor System과 Motor&감속기 System의 출력이고, 둘째 열, 3개의 Fig.는 감속기의 댐핑을 고려하지 않고, 개인을 다르게 했을 때 Motor System과 Motor&감속기 System의 출력인데 다소 오버슛이 크고, 진동현상도 더 많음을 알 수 있다. 셋째 열, 3개의 Fig.는 감속기의 댐핑을 고려하여, 개인을 다르게 했을 때 Motor System과 Motor&감속기 System의 출력이다. 적절한 감속기의 댐핑을 고려한 결과 어느 정도 Real System과 Model System이 유사한 성향이 나타남을 알 수 있다.

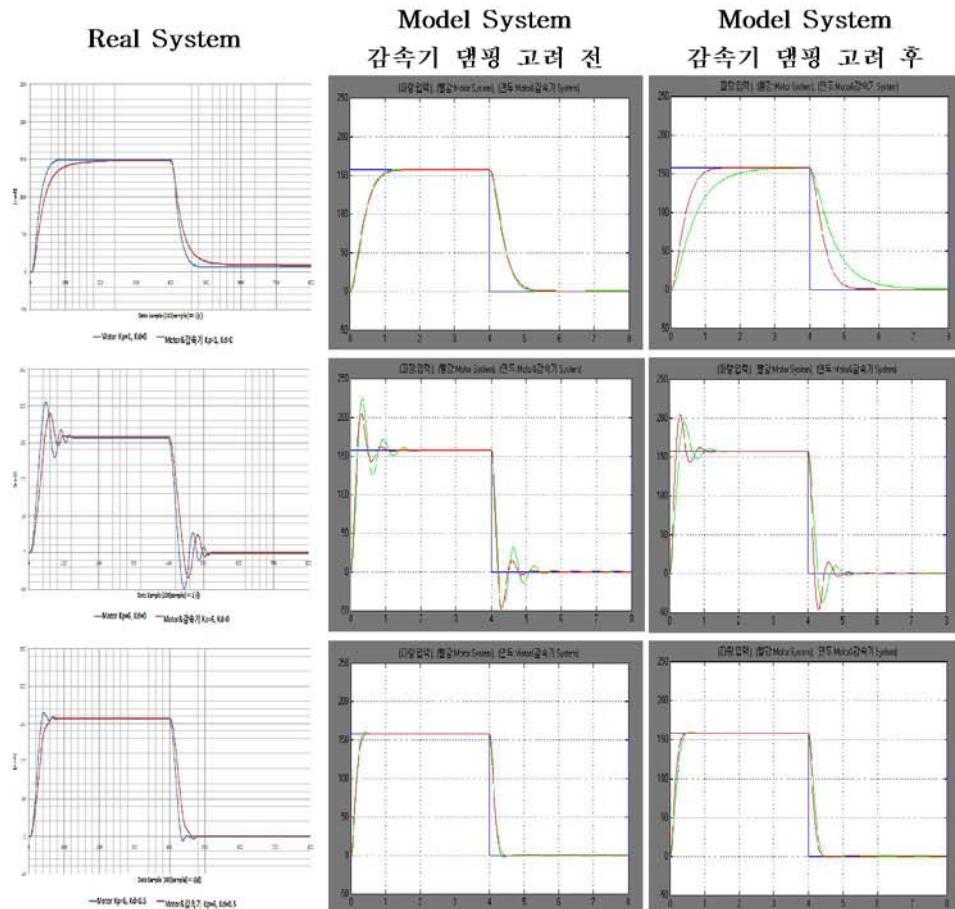


Fig 3.19 Compare real system and model system

c. 결론

Motor Shaft와 감속기사이에 발생한 응답지연은 감속기의 강성 및 마찰 등으로 인한 응답지연으로 판단된다. 실험결과를 통하여 링크 관성의 영향을 무시할 때, Motor로부터 부하까지 동력을 전달하는데 어느 정도 응답지연이 있음을 알 수 있다. 감속기의 감쇄요소를 고려함으로써 Real System과 Model System과의 gap을 어느 정도 줄일 수 있다. 감속기를 고려함으로써 위상지연이 발생하였는데 이러한 요인은 전체 시스템의 안정성에 좋지 않은 영향을 미칠 가능성이 있으므로 감속기의 댐핑요소의 고려에 대한 타당성을 제공한다.

3.4.4 Actuator 출력토크

1. 근사화를 통한 입력전압에 따른 모터 출력토크 전달함수

a. Modeling

전기방정식으로부터 전압과 전류의 관계식을 구하고, 일반적인 경우에서와 같이 속도-토크선도(전압-전류)를 얻기 위해 인덕턴스에 의한 코일의 Dynamics를 배제한 정상상태에서의 전압-토크 관계식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} v_{IN} &= L \frac{di}{dt} + Ri + K_E \dot{\theta} \\ &= Ri + K_E \dot{\theta} \quad (\because \text{when steady state, } L \frac{di}{dt} \approx 0) \\ &= \frac{R}{K_t} T + K_E \dot{\theta} \end{aligned}$$

b. 속도-토크선도

모델링된 속도-토크방정식은 일차식이므로 다음을 통하여 속도-토크선도를 알 수 있다.

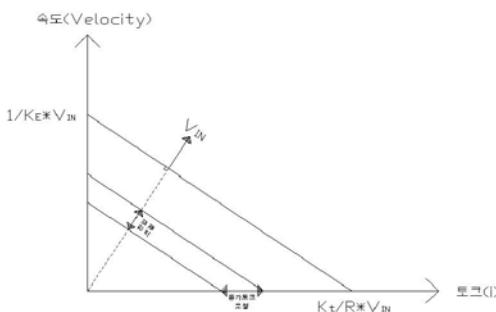


Fig 3.20 Torque vs Velocity

$$\text{속도가 } 0\text{일 때 } T = \frac{K_t}{R} v_{IN}, \text{ 토크가 } 0\text{일 때 } \dot{\theta} = \frac{1}{K_E} v_{IN}$$

c. 입력전압에 따른 출력토크

$$T = \frac{K_t}{R} (v_{IN} - K_E \dot{\theta})$$

System의 입력전압에 따른 출력속도 실험데이터에서 전압에 따른 모터 출력속도가 일정한 구배를 가지고 있을 경우 모터의 각속도는 전압의 식으로 바꿀 수 있고 다음과 같이 입력전압에 따른 출력토크의 관계식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} T &= \frac{K_t}{R} (v_{IN} - K_E \{const \cdot v_{IN}\}) \\ &= \frac{K_t (1 - K_E \cdot const)}{R} v_{IN} \end{aligned}$$

즉, 위와 같이 유도된 공식으로부터 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.
 단, System에 걸려있는 부하가 추가 또는 감소하게 되면 입력전압에 따른 모터의 출력속도는 변하게 되고 따라서 b.emf전압이 변하여 출력토크 또한 변하게 될 것이다. 따라서 입력전압에 따른 System이 낼 수 있는 출력토크를 알고자 할 경우 System에 주어진 부하를 고려하여 부하의 변동에 따른 실제 모터의 속도를 구한 후 그에 따른 토크를 구해야 한다.

d. 결론

	느린 속도로 구동	빠른 속도로 구동
작은 부 하	b.emf전압은 작고 입력되는 전압의 대부분은 토크를 발생시키는데 사용된다. -> 작은 부하가 걸려 있으므로 pwm전압을 적게 필요로 한다.	b.emf전압은 크고 입력되는 전압에서 b.emf전압에 따른 손실분을 뺀 만큼의 전압이 토크를 발생시키는데 사용된다. -> pwm전압을 많이 필요로 한다.
큰 부 하	b.emf전압은 작고 입력되는 전압의 대부분은 토크를 발생시키는데 사용된다. -> 큰 부하가 걸려 있으므로 pwm전압을 작은 부하를 느린 속도로 구동하는 경우보다 많이 필요로 한다.	b.emf전압은 크고 입력되는 전압에서 b.emf전압에 따른 손실분을 뺀 만큼의 전압이 토크를 발생시키는데 사용된다. -> 큰 부하를 빠른 속도로 구동해야 하므로 가장 많은 pwm전압을 필요로 한다.

Table 3.4 Relation between pwm and torque

3.5 Position Feedback

1. System Parameter

Real System 출력데이터와 모델링 된 Model System의 Simulation을 비교하는 과정에서 수정된 Parameter를 포함하여 System Parameter들을 재정의 한다.

Err Gain	0.01
Amp Gain	4.84
Amp 시상수	0.11
Kt	0.0302 [Nm/A]
R	0.316 [ohm]
Jm	0.0000134 [kg-m^2]
JL	0.0000404 [kg-m^2]
Bm	0.0019 [Nm/(rad/s)]
BL	0.001 [Nm/(rad/s)]
k	16000 [Nm/rad]

Table 3.5 System parameter

2. Total System Block Diagram (Motor&감속기)

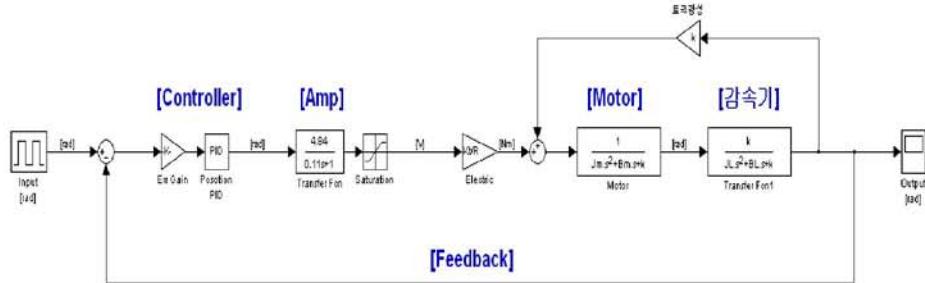


Fig 3.21 Block diagram of the position feedback total system

3. Real System Response & Modeled System Response Simulation

a. Real System & Model System

다음은 보상기의 게인이 각각 ($K_p=1, K_d=0$), ($K_p=6, K_d=0$), ($K_p=6, K_d=0.5$) 일 때 실제 모터의 엔코더펄스로부터 나오는 System 출력과 모델링 된 전달함수를 Simulation해 본 결과를 비교한 것이다.

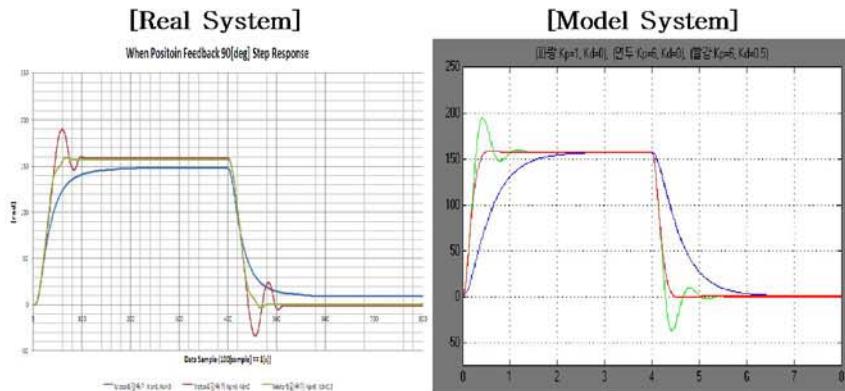


Fig 3.22 Compare real system and model system

앞서 모터 전달함수를 실제 엔코더펄스로부터 나오는 데이터와 비교하는 과정에서 언급했듯이 Model System의 응답이 다소 빠르나 이는 앰프전달함수의 단순화 과정으로 자연요소를 제거하는 과정에 원인이 있다고 판단된다. 또한 감속기($B_L = 0.001$) 및 모터($B_m = 0.0019$)의 땜평요소 선정에 어느 정도 오차가 있을 수 있다. 따라서 실제 데이터와의 일치여부에 초점을 맞추는 것이 아니라 각 게인셋팅에 따른 응답성향을 확인하고, 안정성 여부를 대략적으로 확인하기 위한 목적을 위해 전달함수가 타당하게 모델링이 되었는지 여부에 초점을 맞추어 비교실험에 의의를 두고자 한다.

처음 $K_p=1$ 로 게인을 설정하였을 때에는 게인이 너무 낮아 응답속도가 느렸다. 다음 $K_p=6$ 으로 게인을 설정하였을 때에는 게인이 높아져 응답속도가 빨라졌으나 과도한 오버슛을 일으켰다. 마지막으로 $K_p=6$, $K_d=0.5$ 로 게인을 설정할 때에는 D-gain의 영향으로 진동효과가 사라져 만족할 만한 응답성능을 보였다.

4. 제어요소 전달함수

a. 제어요소 전달함수

$$PID = PIDgain \cdot \frac{K_D s^2 + K_P s + K_I}{s} = 0.01 \cdot \frac{K_D s^2 + K_P s + K_I}{s}$$

$$Amp = \frac{4.84}{0.07s + 1} e^{-0.04} \approx \frac{4.84}{0.11s + 1} = \frac{44}{s + 9.1}$$

$$Plant = \frac{\frac{k \cdot K_t}{R}}{J_m J_L s^4 + (B_m J_L + B_L J_m) s^3 + \{k(J_m + J_L) + B_m B_L\} s^2 + k(B_m + B_L) s}$$

System TF

$$\begin{aligned} &= PID \cdot Amp \cdot Plant \\ &= \frac{44 \cdot \frac{k K_t}{R}}{J_m J_L} \times \frac{K_D s^2 + K_P s + K_I}{s(s+9.1)s^4 + \left(\frac{B_m}{J_m} + \frac{B_L}{J_L}\right)s^3 + \left\{k\left(\frac{1}{J_L} + \frac{1}{J_m}\right) + \frac{B_m B_L}{J_m J_L}\right\}s^2 + k\left(\frac{B_m}{J_m J_L} + \frac{B_L}{J_m J_L}\right)s} \end{aligned}$$

b. 특성방정식의 일반형

$$1 + KG(s) = 1 + K \frac{p(s)}{q(s)} = 0$$

5. P제어기에 의한 Position Feedback System 안정도

a. $K_p=6$ 일 때 시스템안정도

특성방정식의 일반형으로부터 근궤적을 구하고, System Parameter를 적용한 매개변수 K의 값을 구하면 다음과 같다.

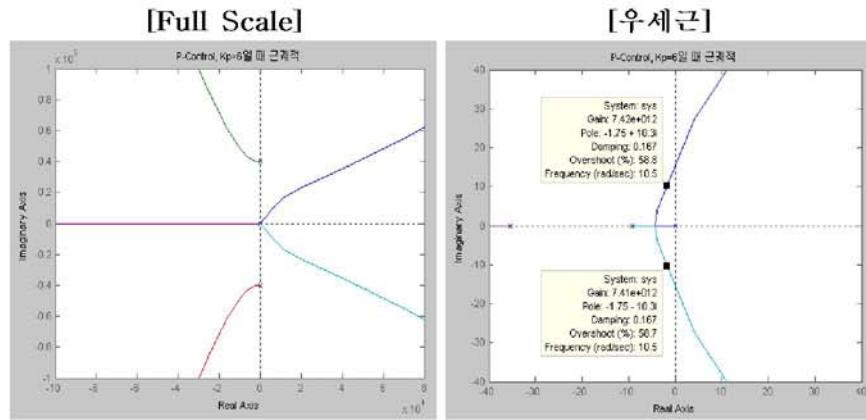


Fig 3.23 when $K_p=6$ in P-control, system stability

$$K = \frac{0.06 \cdot 44 \cdot \frac{k K_t}{R}}{J_m J_L} \approx 7.4569e + 12$$

근궤적으로부터 P 계인을 6으로 설정할 경우 복소평면 실수축의 좌판평면에 위치하여 Step입력에 대한 System의 응답은 안정한 상태에 놓이게 되나 Overshoot이 발생하는 것을 알 수 있다. 만약 P 계인을 더 높이면 극점은 복소 평면의 우반평면으로 향하게 되어 불안정한 상태에 놓이게 되는 것을 예상할 수 있다. 따라서 P 제어만을 실시할 경우 다소 큰 Overshoot이 발생하므로 이를 보상하기 위해서 D 제어를 제어기의 추가시켜야 함을 알 수 있다.

b. $K_p=10$ 일 때 시스템안정도

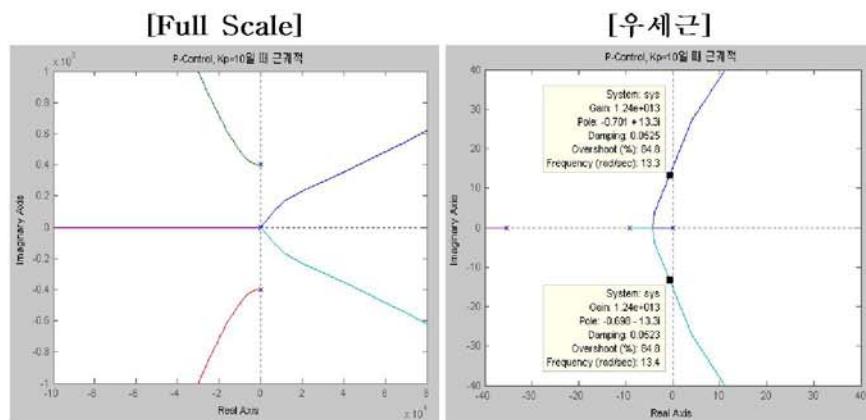


Fig 3.24 when $K_p=10$ in P-control, system stability

$$K = \frac{0.1 \cdot 44 \cdot \frac{k K_t}{R}}{J_m J_L} \approx 1.2428e + 13$$

$K_p=10$ 일 경우 극점은 허수축에 가까워져 진동현상이 $K_p=6$ 일 경우보다 더 심하게 나타나는 것을 알 수 있다.

6. PD제어기에 의한 Position Feedback System 안정도

a. $K_p=6, K_d=0.5$

System TF

$$\begin{aligned} &= PID \cdot Amp \cdot Plant \\ &= \frac{0.01 \cdot 0.5 s^2 + 6s \cdot 44 \cdot \frac{k K_t}{R}}{s(s+9.1)s\{J_m J_L s^3 + (B_m J_L + B_L J_m) s^2 + \{k(J_m + J_L) + B_m B_L\} s + k(B_m + B_L)\}} \\ &= \frac{K \cdot s^2 + \frac{6}{0.5}s}{s(s+9.1)s^4 + \left(\frac{B_m}{J_m} + \frac{B_L}{J_L}\right)s^3 + \left\{k\left(\frac{1}{J_L} + \frac{1}{J_m}\right) + \frac{B_m B_L}{J_m J_L}\right\}s^2 + k\left(\frac{B_m}{J_m J_L} + \frac{B_L}{J_m J_L}\right)s} \\ &\quad (\text{단, } K = 0.01 \cdot \frac{0.5 \cdot 44 \cdot \frac{k K_t}{R}}{J_m J_L}) \end{aligned}$$

특성방정식의 일반형으로부터 균제적을 구하고, System Parameter를 적용한 매개변수 K의 값을 구하면 다음과 같다.

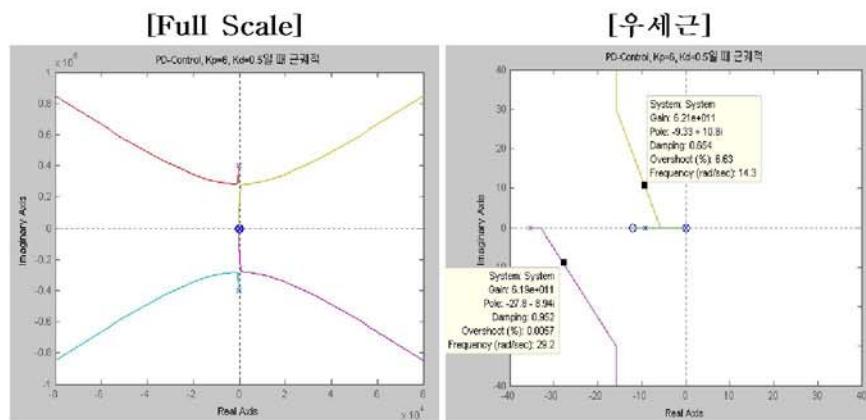


Fig 3.25 when $K_p=6, K_d=0.5$ in PD-control, system stability

$$K = \frac{0.01 \cdot 0.5 \cdot 44 \cdot \frac{k K_t}{R}}{J_m J_L} \approx 6.214e + 11$$

$K_p=6$, $K_d=0.5$ 로 설정할 경우 약간의 진동현상은 있으나 복소평면 실수축의 좌반평면에 극점이 존재하게 되어 시스템은 안정한 상태가 됨을 알 수 있다. 또한 근궤적으로부터 Overshoot은 P제어만을 실시했을 경우보다 현저하게 줄어듦을 확인할 수가 있고, D제어를 추가함으로써 응답속도를 높이기 위하여 P제인을 높일 경우 극점은 여전히 복소평면의 좌반평면에 존재하여 System은 안정한 영역에서 동작함을 예측할 수 있다.

따라서 System의 구동을 통하여 근궤적으로부터 알 수 있는 안정한 범위에서 제인을 셋팅하고, PD제어를 할 경우 System은 안정하다고 결론지을 수 있다.

b. Real gain setting

프로그램으로 구성된 디지털 제어기에서 PD Control을 위한 제인셋팅은 근궤적으로부터 알 수 있는 안정한 영역에서의 제인을 약간의 반복과정을 통하여 구할 수 있다.

3.6 제어알고리즘

1. FSR Input

a. Input Force Algorithm

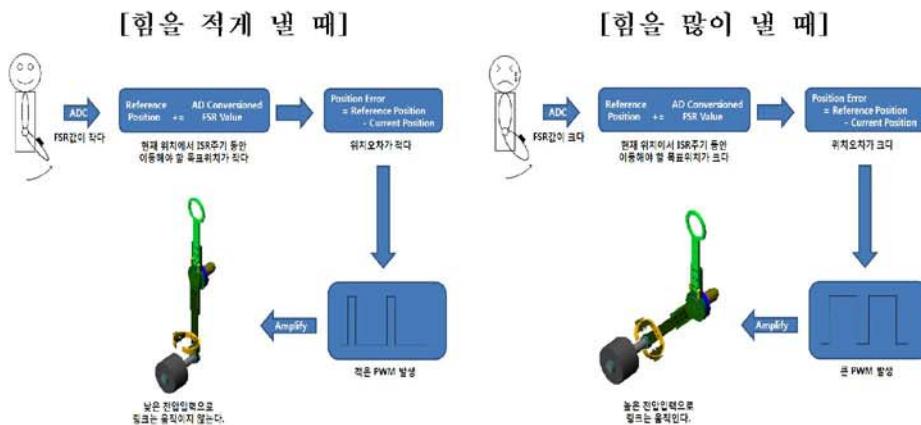


Fig 3.26 System operating concept

Controller는 FSR을 이용하여 사용자가 내는 힘에 비례하여 발생하는 아날로그 전압 signal을 ADC를 통하여 디지털 값으로 입력받고, FSR의 적분값이 Reference Position Command로 입력되어 FSR값에 따라 링크는 다음의 세 가지 경우로 동작할 수 있다.

- 사용자가 힘을 내지 않아 FSR값이 0인 경우

Reference Position은 더 이상 증가하지 않고, 위치오차는 0이 되어 PWM은 발생하지 않는다. 따라서 링크는 현재의 위치에서 정지하게 되고, Controller는 Position Feedback을 하여 현재의 위치를 유지하게 된다. 즉, FSR값이 0이 되어 추종해야 할 위치가 현재의 위치일 때 외란이 가해졌을 경우 위치오차가 발생하게 되고, 오차가 발생되기 이전의 위치로 돌아가기 위해 Position Controller는 PWM을 발생시켜 입력전압에 따른 출력토크의 관계로부터 토크를 내게 된다.

- 사용자가 일정한 힘을 내어 FSR값이 일정한 경우

만약 사용자가 일정한 힘을 내어 FSR값을 일정하게 유지하면, Reference Position의 위치는 System 주기마다 FSR값만큼 일정하게 증가하게 되고, 일정한 위치오차가 발생하여 Position Controller는 일정한 PWM을 발생시켜 링크는 일정한 토크를 발생시킨다. 따라서 FSR값이 0이 될 때까지 일정한 속도로 증가하는 Reference Position에 의하여 발생되는 토크를 유지하게 된다. 결국 일정하게 입력되는 FSR값이 작을 경우 작은 토크를 발생시키고, FSR값이 클 경우 큰 토크를 발생시킨다.

- 사용자가 내는 힘을 점점 증가시켜 FSR값이 증가하는 경우

사용자가 힘을 서서히 증가시켜 FSR값을 증가시킨다면 FSR값이 작은 값에서 큰 값이 되므로 작은 토크에서 큰 토크를 발생시킨다.

b. 입력제한범위 설정

짧은 시간동안의 큰 FSR값이 입력되면 링크는 System주기 동안 이동해야 하는 거리가 그만큼 많아지게 되므로 빠른 속도로 회전해야 한다. 따라서 모터 및 감속기의 수명을 고려하고, 성능저하를 막기 위해 속도제한을 설정해 놓아야 한다. 속도제한 설정을 위해 허용한도 내에서 FSR값의 입력에 제한을 설정하여 이러한 System의 성능을 저하시키는 요인을 제거해야 한다.

모터 및 감속기의 수명을 고려하여 Motor의 Max Speed를 6000[rpm]으로 제한한다면, 다음과 같은 방법으로 Max Speed를 발생시키기 위한 FSR값을 고려함으로써 FSR값의 제한범위를 설정할 수 있다.

모터 shaft가 1회전 할 때 출력되는 엔코더펄스 수는 4096[pulse]이므로 모터가 6000[rpm]으로 회전할 때 1[s]동안 출력되는 엔코더펄스 수는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} 6000[\text{rpm}] &= \frac{6000}{60} [\text{rev}/\text{s}] \\ &= 100 [\text{rev}/\text{s}] \times 4096 [\text{pulse}/\text{rev}] = 409600 [\text{pulse}/\text{s}] \end{aligned}$$

따라서 System 제어주기인 1[ms]동안 출력되는 엔코더펄스 수는 다음과 같다.

$$1[\text{ms}] : y[\text{pulse}] = 1[\text{s}] : 409600[\text{pulse}]$$

$$\therefore y = 409600 \times 0.001 = 409.6 [\text{pulse}/1\text{ms}]$$

즉, 1[ms]동안 모터가 회전해야 할 Reference Position이 약 400을 넘을 경우 모터는 6000[rpm]이상의 속도로 회전하게 된다. 따라서 10[bit]의 분해능으로 AD Conversion 된 FSR값의 범위를 400이하로 제한하여야 한다.

2. System Flowchart

a. Flowchart

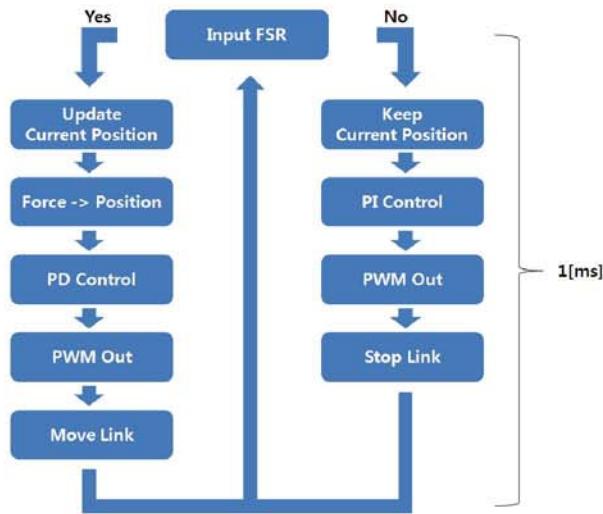


Fig 3.27 System operating algorithm

3. Feedback Mode Switching

a. Block Diagram for Mode Switching Simulation

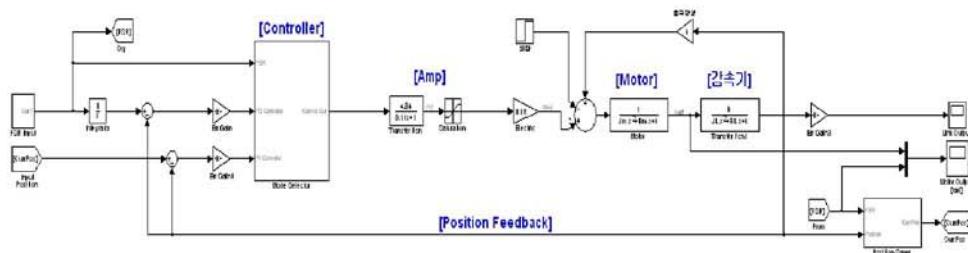


Fig 3.28 Block diagram of the mode switching system

b. 필요성

제어기가 PD제어를 수행하여 링크를 운동시킬 때 D제어에 의하여 Oscillation을 어느 정도 방지할 수 있으나 운동 후 링크가 정지 상태에 있게 되고, 외란이 입력되면 이에 대하여 강인한 보정을 할 수 없게 된다. 따라서 링크가 운동

중에 있을 때에는 PD제어를 수행하고, 링크가 정지 상태에 있을 때에는 PI제어를 실시하는 상황에 맞게 Feedback Mode를 Switching하여 보다 강인한 제어기를 만들 필요가 있다.

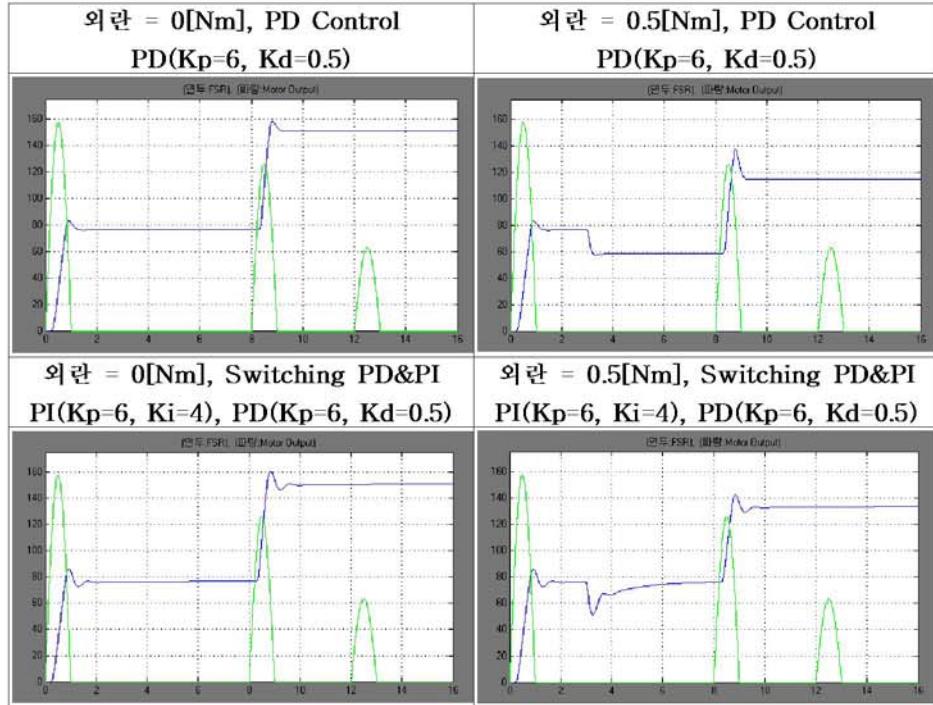


Fig 3.29 Simulation of the mode switching (FSR 크기= 157(Link90°))

0[s]~1[s]동안은 사용자가 힘을 발휘하여 FSR값이 존재하여 링크가 움직여 PD제어를 수행하는 구간이고, 링크가 정지한 후 3[s]가 되는 시점에 0.5[Nm]의 외란이 System에 가해지고, 8[s]가 되는 시점에 사용자가 힘을 발휘하여 FSR 값이 다시 나타나고, 12[s]가 되는 시점에서 나타나는 FSR값은 사용자가 힘을 발휘하는 하한선을 FSR값이 100이상인 경우로 제한하여 System은 이때의 FSR값을 외란으로 인식하고 PI제어에 의하여 링크를 현 위치에 고정시킨다. 이러한 과정에 의하여 Simulation된 결과를 보면 다음과 같이 결론을 내릴 수 있다.

PD Control만 수행하여 FSR의 입력으로 링크가 특정위치까지 이동 후 외란이 없다면 해당 위치를 잘 유지한다. 하지만 외란이 있게 될 경우 Simulation에서와 같이 외란의 영향으로 링크는 위치오차가 생기게 된다.

따라서 링크가 이동하는 순간에는 PD제어를 수행하여 응답성능을 향상시키고, 링크가 정지하는 순간에는 PI제어를 수행하여 특정위치에 부하를 고정함으로써 외란의 영향에 강인한 제어를 수행할 수 있다. Mode Switching

Simulation을 보면 FSR의 입력으로 링크가 특정 위치까지 이동 후 외란이 가해졌을 때 PI제어를 수행함으로써 외란의 영향으로 생기는 오차가 줄어듦을 알 수 있다.

c. Mode Switching을 통한 외란에 대한 장인성 확보

FSR의 값에 따라 수행되어져야 하는 제어환경이 변하므로 제어환경에 맞게 피드백제어를 수행하여야 한다. 따라서 위의 과정으로부터 FSR값이 특정값 이하인 경우 링크는 정지하게 되어 현재의 위치를 잘 추종해야 하므로 PI-Control을 실시하고, FSR값이 특정값 이상인 경우 링크는 이동하게 되는데 이동 중 System의 급격한 운동은 사용자에게 충격을 주어 좋지 않은 영향을 미치게 되므로 PD-Control을 실시한다. 여기서 FSR값을 특정값 이상 또는 이하로 설정하는 이유는 센서 노이즈 및 외부적인 요인에 의한 FSR값의 Oscillation현상이 나타나기 때문이다. 따라서 사용자가 확실한 의도로 FSR에 힘을 작용하는 범위를 실험을 통하여 얻은 후 그 값을 Boundary로 설정한다.

4. System Realization

4.1 Data Acquisition(DAQ)

1. DAQSys Specification

a. DAQ Frequency Bandwidth

Data Acquisition에서 주파수 대역폭은 데이터의 해상도를 결정하는 주요 요인이다. 원하는 정보를 갖는 signal의 주파수성분이 Data Acquisition의 대역폭을 넘어설 경우 Sampled Signal은 Original Signal과의 신호왜곡이 일어나 Original Signal이 가지고 있는 정보의 의미를 올바르게 해석할 수 없게 된다.

따라서 왜곡이 없는 샘플링이 가능한 신호의 최대 주파수를 확인하고, 해당 범위 내에서 Data Acquisition을 실시하여야 한다.

b. Data Acquisition

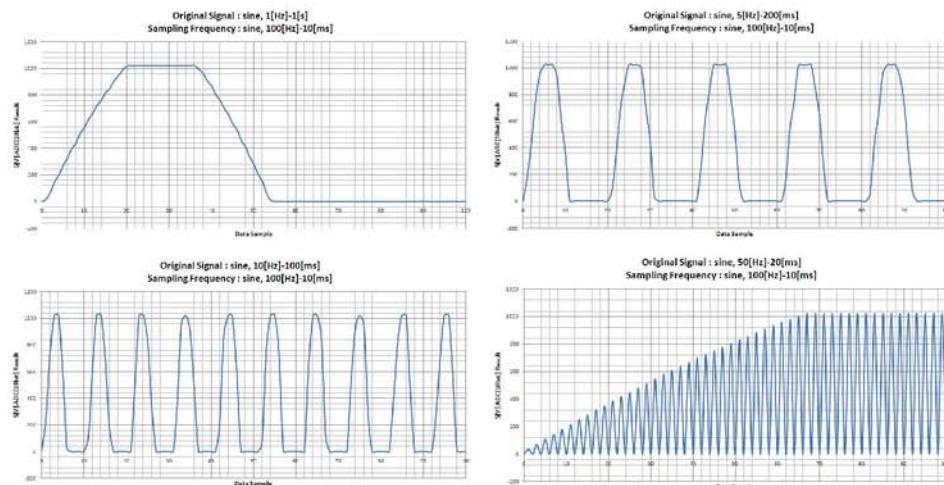


Fig 4.1 When input frequency changed, DAQ result

Function Generator를 이용하여 1, 5, 10, 50[Hz]의 Signal을 각각 생성하고, Controller를 이용하여 100[Hz]의 간격으로 샘플링 한다. 샘플링 된 데이터는 Serial통신을 이용하여 PC로 전송되고 DAQSys를 이용하여 Data Acquisition이 수행된다.

실험결과 1[Hz] 주파수성분의 signal에 대한 Data Acquisition의 경우 5[V]로 설정된 ADC Reference Voltage에 의하여 sine파의 윗부분이 잘려나간 것을 제외하면 원 신호와 거의 일치하는 Sampled Signal을 획득할 수 있었고, 주파수가 높아질수록 신호의 왜곡 또한 점점 증가하는 현상을 확인할 수 있는데

50[Hz]의 주파수성분을 갖는 Original Sine signal을 100[Hz]의 샘플링 주파수로 샘플링 할 경우 신호의 왜곡으로 인하여 Original Signal의 성분을 제대로 파악할 수가 없게 된다.

샘플링 이론과는 달리 50[Hz]의 Original Signal을 100[Hz]의 Sampling Frequency로 샘플링을 실시하였을 때 신호의 왜곡이 일어남을 확인할 수 있는데 이는 Controller의 내부적인 연산으로 인한 시간지연에 원인이 있다고 판단된다. 따라서 신호의 왜곡이 없이 데이터를 샘플링 할 경우, 적어도 10[Hz]이하의 주파수성분을 갖는 Signal에 대하여 100[Hz]의 샘플링 주파수를 갖는 DAQSys를 이용하여 DAQ를 실시해야 하는 것을 알 수 있다.

c. 결론

일반적으로 사람의 움직임은 1~2[Hz] 이하의 주기를 갖고 있으므로 팔의 움직임을 1[Hz]의 주기로 가정한다면 DAQSys를 이용한 Data Acquisition의 샘플링 신호는 System의 구동상태를 파악하는데 사용될 수 있다.

2. DAQSys Serial Communication

다음은 Microsoft Visual Studio에서 제공하는 MFC를 이용하여 Programming 한 DAQSys Program의 흐름도이다. User의 입력으로 Serial통신을 위한 환경을 셋팅하면 쓰레드가 생성되어 COM port를 통하여 데이터가 들어올 경우 할당된 버퍼에 데이터를 임시적으로 저장한 후 모프로세스에게 윈도우 핸들을 이용하여 메시지를 날리면 모프로세스는 해당 메시지를 받아 COM port로부터 데이터가 들어온 것을 확인하고 들어온 데이터를 사용하게 된다. 만약 통신쓰레드로부터 메시지가 날라오지 않았을 경우 모프로세스는 자신의 작업을 수행하게 된다.

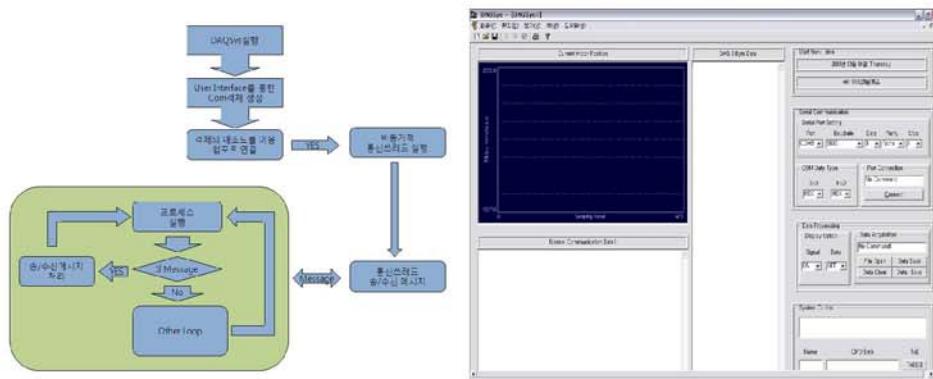


Fig 4.2 DAQSys algorithm

4.2 전체 System 구성도

1. System 정의

System은 SISO(Single Input-Single Output)으로 가정하여 앰프를 통하여 모터단자에 인가되는 전압을 제어입력으로 하고, 모터 Shaft를 제어출력으로 한다. System은 모터용량의 한계로 인하여, 구현된 힘도움 System의 능력을 120[W]의 Power로 상한선을 정하고 상한선이 넘지 않는 범위내에서 System을 구동한다. 또한 이론적 System해석은 연속영역에서 실시하고 실제 Simulation은 디지털 제어기를 이용한 이산영역에서 실시한 후, 두 결과를 비교함으로써 Modeling된 System의 타당성 및 안정성을 확인한다. 이는 System의 안정성을 검증하는데 시간을 단축하여 Engineering에 드는 자원의 소모를 줄이기 위함이다.

2. Virtual Total Exoskeleton System Diagram

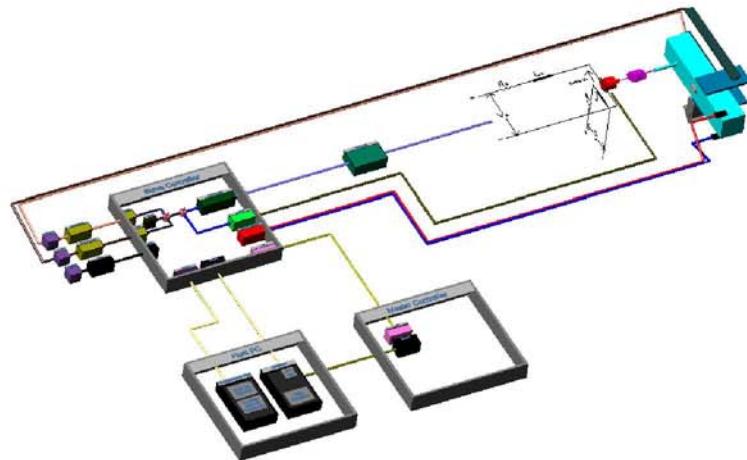


Fig 4.3 Virtual total exoskeleton system

3. Real Total Exoskeleton System for experiment

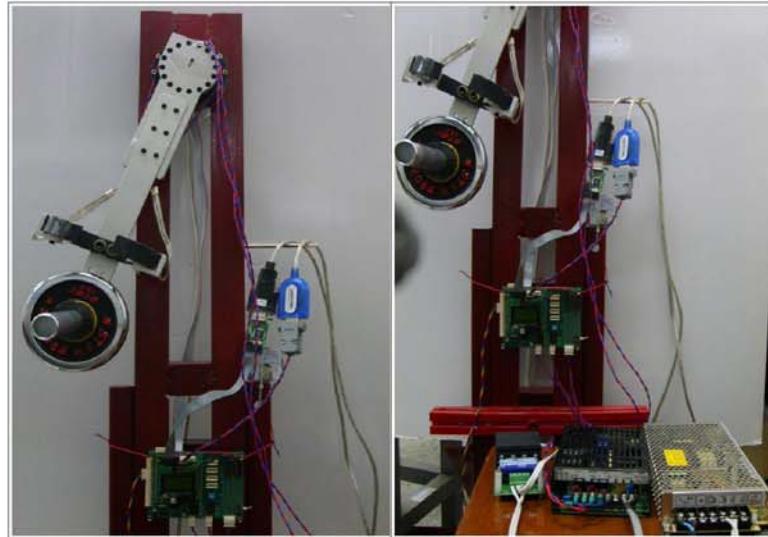


Fig 4.4 Real total exoskeleton system configuration

4.3 System 구현

1. System 구동 상황 설정

간단한 Keypad의 조작으로 System의 구동모드(Modeling된 System의 해석을 바탕으로 설정 된 개인조절)를 설정함으로써 상황에 맞게 System 구동을 위한 설정을 최대화 한다. 또한 System구동을 단계별로 구분하여 System을 사용하는 노인 및 장애인들의 근력을 점진적으로 증강시킨다.

[상황1 - 사용자의 근력 강화 전]

근력을 증강시키는 단계로 움직임이 가능하나 일상생활에서 원활한 활동을 하기에는 다소 제약이 따르는 사용자를 적용대상으로 한다. 따라서 System은 높은 개인으로 설정되어 사용자에 의하여 발생되는 적은 제어입력소스에 대하여 잘 반응하여야 한다.

[상황2 - 사용자의 근력 강화 후]

힘도움 기기의 도움으로 사용자의 근력은 다소 강화되어 좀 더 유연한 사용자의 활동을 돋는 단계로 System은 사용자가 발생하는 제어입력소스에 대하여 잘 반응하여야 한다. 즉, 사용자가 힘을 많이 내거나 적게 낼 때 또는 사용자가 빠르게 움직이고자 할 때나 느리게 움직이고자 할 때의 상황을 잘 파악하여 그에 따른 제어가 실시되어야 한다.

[상황3 - 사용자의 힘 증폭]

사용자의 일상생활이 가능한 상태에서 사용자의 힘을 증폭시켜주어야 하는 상황로 사용자의 능력을 넘어서는 힘을 필요로 할 때 System은 개인을 높여 사용자가 발생하는 제어입력소스보다 더 많은 제어출력을 내야 한다.

2. System 구동

a. System 적용 가능성 검증

다음은 실험을 통한 객관적인 사실에 근거하여 System의 적용 가능성을 증명한 것이다. 일반적인 경우 사람의 손가락 하나만을 이용하여 5[kg]의 물건을 들지 못하지만, 본 논문에서 개발된 System을 이용함으로써 약간의 손가락 힘을 이용하여 5[kg] 이상의 물건을 들 수 있음을 실험을 통하여 증명하였다.

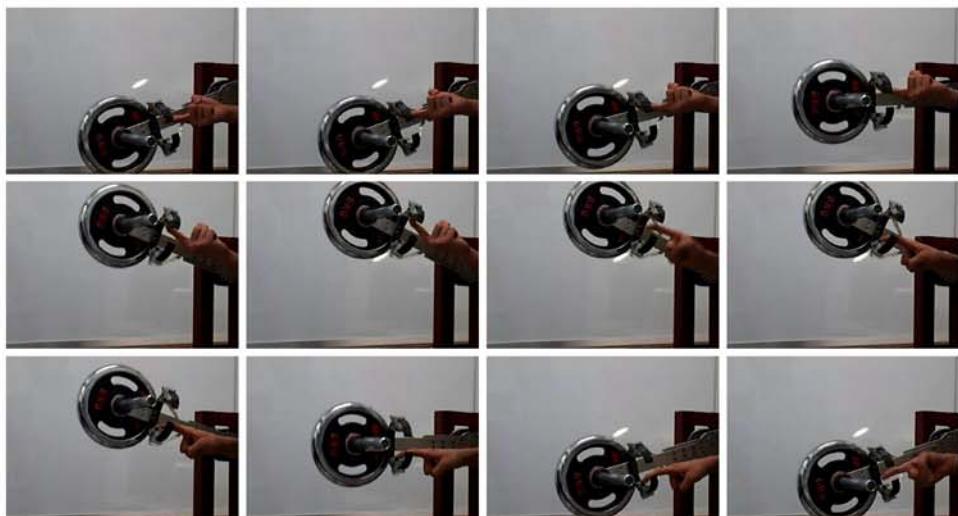


Fig 4.5 System operating experiment by finger

b. System 구동

다음은 실제 적용 사례를 System 구동실험을 통하여 제시한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 직접적인 손목의 Force가 System으로 전달이 되어야 System 구동이 가능함을 알 수 있다. 손목부위 근육의 탄성으로 인한 제어입력소스의 Oscillation은 약간의 반복연습을 통하여 극복이 가능할 것으로 보이며, 각 사용자의 의도에 맞게 동작하는 최적의 상황으로 System을 구동하기 위해서는 간단한 Keypad를 통한 몇 차례의 System Parameter의 설정이 필요하다. 이러한 과정을 거치고 나면 사용자는 System의 도움으로 근력의 증강 및 더 많은 힘을 발휘할 수 있을 것이다.



Fig 4.6 System operating experiment by wrist

5. 결론 및 고찰

5.1 최종 연구/개발 성과

1. Low Cost

기구부 재료비	200,000원
기구부 가공비	900,000원
Controller MCU & Interface	50,000원
FSR Sensor	50,000원
DC Motor	500,000원
Amp	100,000원
Power Supply (MCU&Amp)	100,000원
감속기	1,000,000원
합계	2,900,000원

Table 3.6 System cost

무료로 제공되는 개발환경을 이용하여 Digital Micro Controller의 개발비용을 줄이고, 시중에 시판되고 있는 Low Cost Digital Amp를 이용하여 Motor Driver에 소요되는 비용을 절감하였다. 링크부의 하드웨어 제작에서 가공비가 전체 비용의 1/3이상의 비용이 소요되었는데 추가적인 하드웨어의 채설계를 통하여, 기구부의 Component를 좀 더 범용적인 재질을 사용하여 제작한다면 상당부분 감소시킬 수 있을 것으로 예상된다. 따라서 Actuator 구동에 필요한 고성능의 Motor 및 감속기의 비용을 제외한다면 상당한 개발비용이 절감되었음을 알 수 있다.

2. High Performance

- 고성능의 DC-Motor를 이용하여 0°~135°에 해당하는 System Operating Range에서의 153600의 분해능을 갖고, 이를 바탕으로 각 상황에 맞는 제어방법을 사용함으로써 응답오차를 최소화 하였다.
- System Modeling Analysis를 통하여 System의 안정성을 확보하였으며, 구체적인 제어기 출력 저하요인(감속기 강성, 감속기 마찰, 앰프지연...)을 고려함으로써 응답성능저하를 최소화 하였다.
- 제어 알고리즘 및 기구부의 하드웨어적인 고려를 통하여 사용자의 의도를 확실히 System에 전달하도록 하였고, 실제 System응답과 어느 정도 일치하는 Modeling System의 분석/설계를 통하여 사용자의 의도에 의하여 생성된 제어명령을 잘 추종하는 System을 구현하였다.

3. New Approach

토크제어 시 사용되는 기존의 토크피드백기법이 아닌 새로운 접근을 통하여 토크제어를 위한 센서인터페이스를 위치피드백을 이용한 토크제어알고리즘으로 구현함으로써 기존의 방법에서 소요되는 토크피드백 인터페이스 비용을 제거하였고, 위치제어의 관점에서 System을 구동함으로써 상황에 맞는 제어모드 변경이 가능하게 되었으며, 구현 및 해석에 용이하다.

4. Production

- DC Motor 제어기 개발
- Data Acquisition Program DAQSys 개발
- 위치정보를 이용한 토크제어알고리즘 개발
- System Modeling 및 안정성 검증기법 개발

5.2 결론

본 논문에서는 실제 시스템에 가깝게 System을 Modeling하고, Modeling된 System의 분석을 통하여 안정영역에서 응답성능이 좋은 System을 Design한다면 간단한 FSR(Force Sensing Resister)를 이용한 Exoskeleton의 구현이 가능함을 입증하였다. System Modeling은 Component 단위에서 시작하여 전체로 통합하는 방법을 사용하였으며, Matlab에서 제공하는 Simulink를 이용하여 이론에 의한 Model을 simulation하고, DAQ(Data Acquisition)을 이용한 실제 출력 데이터를 확인하여 두 결과를 비교하고, Matching시키는 과정을 통하여 Modeling 된 System의 타당성을 입증하였다.

이러한 주어진 제어입력을 잘 추종하는 System의 관점에서 개발한 힘도움 기기는 System의 완전한 이해를 바탕으로 한 분석 및 구현이 이루어 져야 하므로 예상치 못한 System 출력이 발생할 경우 이에 대한 제어를 수행할 수 없는 단점이 있고, 또한 제어입력을 잘 추종하는 못하는 System을 설계할 경우 사용자가 의도하지 않은 제어출력을 발생시킬 수가 있다.

한편 충분한 전력을 공급하는 Power Supply를 사용함으로써 전원문제에 대한 고려를 배제하였으므로 추후 사용자와 일치되어 공간상의 제한 없이 System을 사용하고자 할 경우 이에 대한 고려가 반드시 필요하다. 또한 다소 간단한 방법으로 FSR을 System에 고정시켜 부착상황에 따라 제어입력소스의 값이 변하므로 하중에 따라 입력값이 선형적으로 변하는 위치를 찾아 FSR의 위치변동이 없게 고정시켜야 한다.

System은 Max 10[Kg]이내의 부하를 움직일 수 있는 Power를 낼 수가 있고, 보통 5[kg]정도의 부하를 움직이는데 사용될 수 있다. System 특성상 근육의 탄력으로 인한 FSR을 통하여 System에 입력되는 제어입력이 불안정할 수가 있으므로 근육이 가장 적은 손목부위에 FSR을 위치시켜 제어입력을 생성해야 한다.

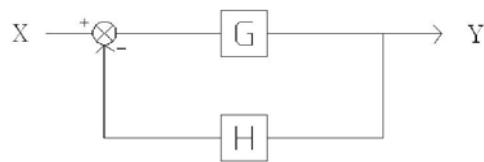
위와 같은 단점을 극복한다면 본 논문에서 제시한 힘도움 시스템은 거동이 불편한 환자나 노인들의 근력강화에 좋은 기기로 사용될 수 있을 것이다.

참고

1. 전달함수 Summing

1. 외란이 없는 피드백 전달함수

a. Block Diagram



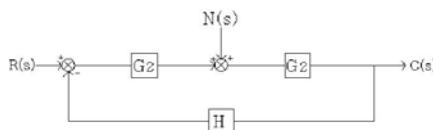
b. Transfer Function

$$\begin{cases} e_{rr} = X - YH \\ Y = e_{rr} G \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} Y = GX - GHY \\ (1 + GH) Y = GY \end{cases}$$

$$\therefore Y = \frac{G}{1 + GH} X$$

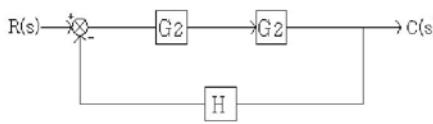
2. 외란이 있는 피드백 전달함수

a. Total Block Diagram



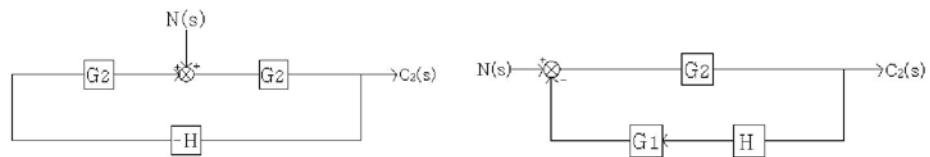
$$C = C_1 + C_2$$

b. 외란 $N(s)=0$ 인 경우



$$C_1(s) = \frac{G_1 G_2}{1 + G_1 G_2 H} R(s)$$

c. System Input $R(s)=0$ 인 경우



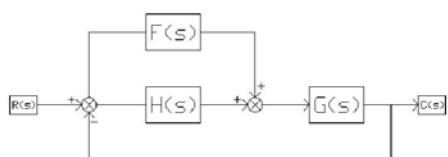
$$C_2 = \frac{G_2}{1 + G_1 G_2 H} N(s)$$

d. $R(s)$ 와 $N(s)$ 가 동시에 가해질 때 출력 $C(s)$

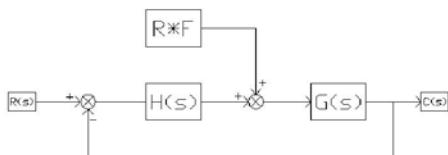
$$C(s) = C_1 + C_2 = \frac{G_2}{1 + G_1 G_2 H} [G_1 R(s) + N(s)]$$

3. Feedforward 전달함수

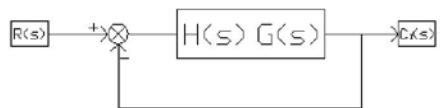
a. Total Block Diagram



b. Block Diagram Simplify

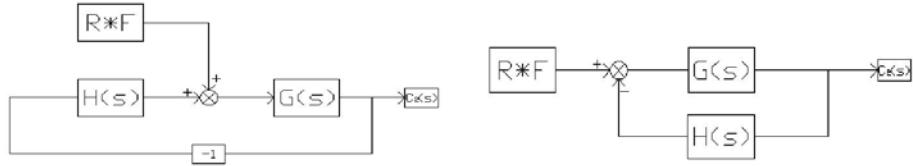


b. 외란 $R(s) \cdot F(s) = 0$ 인 경우



$$C_1 = \frac{H(s) G(s)}{1 + H(s) G(s)} R(s)$$

c. 입력 $R(s)=0$ 인 경우



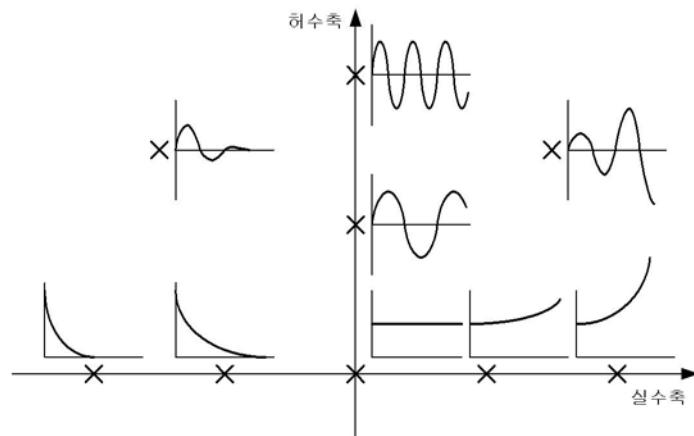
$$C_2(s) = \frac{G(s)}{1 + H(s)G(s)} F(s) R(s) = \frac{F(s)G(s)}{1 + H(s)G(s)} R(s)$$

d. System을 선형이라 가정하고 중첩의 원리를 적용하여 입력에 따른 출력을 구한다.

$$C = C_1 + C_2$$

$$\therefore C(s) = \left\{ \frac{HG}{1 + HG} + \frac{FG}{1 + HG} \right\} R(s)$$

2. 극점위치와 대응되는 임펄스응답 파형



극점위치와 대응되는 임펄스응답파형

참고문헌

- [1] 김정훈, 『인간형 이족 보행 로봇의 동적 걸음새 구현에 관한 연구』, 한국과학기술원 박사학위논문, 2003
- [2] 전홍식, 『저항 점용접에서 입열량 제어를 위한 DSP 기반 지능형 제어기개발』, 명재대학교 석사논문, 2005
- [3] 정치연 & 송신우 & 김재부, 『부축형 보행보조기기 기술개발에 관한 연구』, 산업자원부 제1차년도 보고서, 2007
- [4] 최동운 & 권오홍 & 심재익 & 박종현, 『인간의 보행을 보조하는 2족 보행 로봇 System(Review Paper)』, Hanyang University, Seoul, 2006
- [5] John J. Craig, Introduction to Robotics - Mechanics and Control, 3th Edition, Prentice Hall, 2005
- [6] Mark W. Spong & Seth Hutchinson & M. Vidyasagar, Robot Modeling and Control, John Wiley&Sons Inc., 2006
- [7] Richard C. Dorf & Robert H. Bishop(이균경 & 정은태 옮김), Modern Control Systems, 10th Edition, Prentice Hall, 2005
- [8] 김정한, DSP로 리니어모터 제어하기, 동일출판사, 2006
- [9] Dogan Ibrahim(박전수 역), Microcontroller Based Applied Digital Control, 도서출판 아진, 2008
- [10] W. Bolto(이만형 & 노정태 & 박희재 & 양순용 & 김영배 & 부광석 & 홍대선 공역), Mechatronics, 2nd Edition, 사이텍미디어, 2000
- [11] 김창석 & 김승록, 자동제어, 문운당, 2000
- [12] 김정국 & 박재현 & 김창석, 신호 및 시스템, 문운당, 2005
- [13] 김유진, 임베디드 프로그래밍 C코드 최적화, 한빛미디어, 2008
- [14] 윤덕용, Atmega128을 활용한 졸업작품 만들기, Ohm사, 2005
- [15] 이상엽, Visual C++ programming Bible Ver4.x, 영진출판사, 1997
- [16] Dale & Weems & Headington(서동근 & 김진덕 & 황양규 & 우균 & 전준미 & 지준 & 홍의석 공역), C++를 이용한 프로그래밍, 사이텍미디어, 2002
- [17] 임종수, 임종수의 MATLAB7, 높이깊이, 2007

국문 초록

최근 들어 기술 발전에 힘입어 인간 생활에 직접적인 도움을 주고자 로봇의 힘을 이용하여 인간의 힘을 증폭시켜주는 로봇의 개발에 관심이 커지고 있다. 그에 따라 EMG센서로부터 나오는 근전도 신호를 이용한 여러 Exoskeleton Robot들이 개발되고 있는데, 이를 위해서는 데이터 수집 및 처리 알고리즘이 복잡해지는 문제들과 EMG센서 사용 시 나타나는 단점들을 해결해야 한다.

이에 대한 대안으로 본 논문에서는 거동이 가능한 사용자에 한하여 사용자의 의도를 파악하고 이를 만족할 만한 성능으로 추종하는 제어기로써 Exoskeleton 을 개발한다. 사용자의 힘을 예측하는 센서입력부의 기계적인 감도를 높이는 방법으로 의도를 잘 반영하는 제어입력을 만들었으며, System Modeling을 통하여 주어진 제어명령을 잘 추종하는 제어기를 설계하였다. 이러한 방법을 사용함으로써 설계비용은 감소되고, 시스템구현은 매우 간편해 지며, 이렇게 구현된 시스템을 이용하여 사용자는 적은 힘으로도 큰 힘을 낼 수 있게 된다. 그러나 이러한 방법은 시스템 요소와 시스템 통합이 완벽하게 이루어 져야만 원하는 목적을 달성할 수 있는 단점이 있다.

따라서 본 논문에서는 System Control의 관점에서 이러한 각 구성요소를 구성하고 실험데이터에 근거하여 System 요소의 타당성을 검증한 후 하나의 통합 시스템으로 구축하는 단계적인 절차를 제시한다. 또한 기존에 사용되는 제어기법을 System에 적용하여 제어기의 개인을 조절함으로써 사용자의 균력을 단계적으로 향상시킬 수 있는 방법을 제시한다. 끝으로 실험을 통하여 제안된 System이 균력을 증강시켜주는 힘-도움기기로써 이용 가능함을 보였다.

감사의 글

먼저 짧은 지식으로 논문을 쓴다는 것에 부끄러움을 느끼지만 본 논문의 연구 개발 결과가 인간과 기계가 서로 도움을 주는 Human Machine Interface 분야에 조금이나마 보탬이 되었으면 하는 바람입니다. 지난 2년의 세월은 제 인생에서 그 무엇과도 바꿀 수 없는 너무나 소중한 시간들이었습니다. 아쉬움도 남고, 보람도 있었던 대학원 생활의 결실을 계기로 걸음마를 떼고 끊임없이 노력하여 앞으로 더 나아가겠습니다.

부족한 저를 이끌어 주시느라 고생하신 지금은 연세대학교에서 교정생활을 하고 계신 전 지도교수 김정훈 교수님께 깊은 감사를 드립니다. 남은 한 학기동안 따뜻한 관심과 가르침을 주시는 현 지도교수 이수진 교수님께도 깊은 감사를 드립니다. 바쁘신 와중에도 제 논문을 심사해 주신 박명균 교수님과 박강 교수님께 감사드리며, 기계공학도로서의 소양과 자질을 갖도록 지도해주시고, 명지대학교 기계공학과 소속으로 자부심을 느끼게 해주신 모든 기계공학 교수님들께도 감사를 드립니다.

언제나 항상 따뜻한 관심을 가져 주시며, 엔지니어로써 어떻게 살아가야 하는지를 가르쳐 주시고, 앞으로도 엔지니어 인생의 표본이 될 실무에서 활동하고 있는 엔지니어 전홍식 선배님께 진심어린 감사의 마음을 표합니다.

가는 길은 다르지만 너무나도 나와 뜻이 통하는 소중한 나의 인생친구 현호, 나와 생각이 통하고 같은 길을 가고 있는 수정이, 성격이 비슷한 실험실 생활을 같이 한 현기, 프로젝트를 통해 친해진 동민형, 학교 동기 광환, 후배 원학이, 동환이, 용명이, 창우, 말동무가 되어준 우진이에게도 감사의 마음을 전합니다.

멀리서 나를 지켜보고 응원해 주시는 친/외가의 친척들 에게도 깊은 감사를 드리고, 뇌졸중으로 반신마비가 되어 투병 중이신 나의 외할머니 에게도 깊은 감사를 드립니다. 아직까지도 잘은 모르지만 힘들 때 많은 힘이 되어준 하나님에게도 감사를 드립니다. 10년 동안의 노력으로 결실을 맺은 헤어디자이너인 나의 소중한 누나, 내가 어디에 있든 무슨 일을 하든 항상 최고라고 말씀해 주시는 나의 어머니, 무뚝뚝하지만 행동으로 살아가는 방법을 가르쳐 주신 나의 아버지에게 깊은 감사를 드립니다.

끝으로 살아가는 궁극적인 목적이 되는 나의 가족에게 이 논문을 드립니다.