creative commons

COMMONS DEED

저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

[UCI]I804:24011-200000266923
조선대학교 CHOSUN UNIVERSITY

2018년 8월 석사학위논문 비선형 강건 입력성형제어기 및 터치형 입력성형장치의 개발 김명수

2018년 8월
석사학위 논문

비선형 강건 입력성형제어기 및 터치형 입력성형장치의 개발

조선대학교 대학원
기 계 공 학 과
김 명 수

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

비선형 강건 입력성형제어기 및 터치형 입력성형장치의 개발

Development of nonlinear robust input shaping and touch type remote input shaping device

2018년 8월 24일

조선대학교 대학원

기 계 공 학 과

김 명 수

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

비선형 강건 입력성형제어기 및 터치형 입력성형장치의 개발

지도교수 성 윤 경

이 논문을 공학석사 석사학위신청 논문으로 제출함

2018년 4월

조선대학교 대학원

기 계 공 학 과

김 명 수

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

김명수의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교 수 장 완 식 (인)

위 원 조선대학교 교 수 성 윤 경 (인)

위 원 조선대학교 조교수 강 양 준 (인)

2018년 5월

조선대학교 대학원

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

목 차

List of Figures

List of Tables

Nomenclature

Abstract

제 1 장 서 론 ····· 1

1.1 연구 필요성 ····· 1

1.2 이론적 배경 ····· 2

1.2.1 Zero Vibration(ZV) 입력성형제어기 ····· 5

1.2.2 Zero Vibration Derivate(ZVD) 입력성형제어기 ····· 6

1.2.3 Extra Insenstivity(EI) 입력성형제어기 ····· 7

1.2.4 Unit Magnitude Zero Vibration(UMZV) 입력성형제어기 ····· 8

1.2.5 입력성형제어기 평가 ····· 9

1.3 연구 목적 및 구성 ····· 10

제 2 장 가속도가 제한된 비선형 구동기에 대한 강건 입력성형제어기 ····· 12

2.1 서론 ····· 12

2.2 Robust Acceleration Limit Input Shaper Development ····· 14

2.2.1 가속도 제한을 고려한 ZVD_{AL} 입력성형제어기 ····· 14

2.2.2 가속도 제한을 고려한 EI_{AL} 입력성형제어기 ····· 22

2.3 성능 평가 ····· 29

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2.3.1 ZVD_{AL} 성능 평가 ····· 29
2.3.2 EI_{AL} 성능 평가 ····· 33
2.4 실험적 검증 ····· 36
2.5 결론 ····· 41

제 3 장 비선형 구동기 1st-order를 고려한 강건한 입력성형제어기 ····· 42

3.1 서론 ····· 42
3.2 Robust 1st-order Input Shaper Development ····· 43
3.3 성능 평가 ····· 51
3.4 실험적 검증 ····· 54
3.5 결론 ····· 58

제 4 장 안드로이드 기반의 원격 입력성형장치 ····· 59

4.1 서론 ····· 59
4.2 안드로이드 어플리케이션 개발 ····· 61
4.3 Summary of ZV and UMZV shaper ····· 64
4.4 실험장치 ····· 66
4.5 실험결과 ····· 67
4.6 결론 ····· 70

제 5 장 결론 및 향후 연구 계획 ····· 71

REFERENCE ····· 72
APPENDIX A ····· 76

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

A. Pendulum System 76

APPENDIX B 79

B. Vector Diagram Approach 79

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

LIST OF FIGURES

Fig. 1-1 Flexible System
Fig. 1-2 Input Shaping Technique
Fig. 1-3 Zero Vibration(ZV) shaper
Fig. 1-4 Zero Vibration Derivate(ZVD) shaper
Fig. 1-5 Extra Insensitivity(EI) shaper
Fig. 1-6 Unit Magnitude Zero Vibration(UMZV) shaper
Fig. 1-7 Time Response of Input shaper
Fig. 1-8 Sensitivity of Input shaper
Fig. 2-1 Actuator effects to an ZVD shaper
Fig. 2-2 Equivalent transformation
Fig. 2-3 Pendulum System
Fig. 2-4 Segmentation of a start command
Fig. 2-5 Sensitivity of ZVD shaper and EI shaper
Fig. 2-6 Vector Diagram of an ZVD_{AL} shaper
Fig. 2-7 Actuator effects to an EI shaper
Fig. 2-8 Equivalent transform
Fig. 2-9 Pendulum System
Fig. 2-10 Segmentation of a start command
Fig. 2-11 Vector Diagram of EI_{AL} shaper
Fig. 2-12 ZVD_{AL} Command completeness effects to t_p
Fig. 2-13 ZVD_{AL} Command completeness effects to L_m
Fig. 2-14 Residual Vibration of ZVD_{AL} shaper to κ_a and κ_d
Fig. 2-15 Residual Vibration of ZVD_{AL} shaper to κ_a and t_p
Fig. 2-16 Sensitivity of ZVD_{AL} shaper to L and κ_a
Fig. 2-17 EI_{AL} Command completeness effects to t_p
Fig. 2-18 EI_{AL} Command completeness effects to L_m
Fig. 2-19 Residual Vibration of EI_{AL} shaper to κ_a and κ_d

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Fig. 2-20 Residual Vibration of EI_{AL} shaper to κ_a and t_p

Fig. 2-21 Sensitivity of EI_{AL} shaper to L_m and κ_a

Fig. 2-22 mini-Bridge Crane

Fig. 2-23 Hardware Configuration

Fig. 2-24 Experimental command accuracy

Fig. 2-25 Payload Deflection responses of ZVD, ZVD_{AL}, EI and EI_{AL}

Fig. 2-26 Sensitivity of ZVD_{AL} and EI_{AL} shapers to L/L_m

Fig. 2-27 Sensitivity of ZVD_{AL} and EI_{AL} shapers to κ_a/κ_{am}

Fig. 3-1 Actuator effects to an ZVD shaper

Fig. 3-2 Pendulum System

Fig. 3-3 Segmentation of a start command

Fig. 3-4 Sensitivity of ZVD and EI shaper

Fig. 3-5 Vector Diagram of an ZVD_F shaper

Fig. 3-6 Residual Deflection ZVD_F and ZVD shaper to t_p

Fig. 3-7 Residual Deflection ZVD_F and ZVD shaper to L_m

Fig. 3-8 Sensitivity of ZVD_F shaper to τ_a and τ_b

Fig. 3-9 Sensitivity of ZVD_F shaper to τ_a and L_m

Fig. 3-10 mini-Bridge Crane

Fig. 3-11 Hardware Configuration

Fig. 3-12 Experimental command accuracy

Fig. 3-13 Payload Deflection responses of ZVD and ZVD_F

Fig. 3-14 Sensitivity of ZVD_F and ZVD shapers to L/L_m

Fig. 3-15 Sensitivity of ZVD_F and ZVD shapers to τ_a/τ_{am}

Fig. 4-1 Typical Crane Control Interface

Fig. 4-2 Android Application Architecture

Fig. 4-3 Application Flowchart

Fig. 4-4 r-Pad Screen Configuration

Fig. 4-5 PLC Flowchart

Fig. 4-6 ZV and UMZV shaper

Fig. 4-7 mini-Bridge Crane

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Fig. 4-8 Hardware Configuration

Fig. 4-9 Operator Driving the Crane with Android Control

Fig. 4-10 Oscillation Comparison in Obstacle Course

Fig. 4-11 Deflection Comparison of ZV, UMZV and Noshaper

Fig. 4-12 Rapidness Comparison Between Controller and Input Unit

Fig. 4-13 Intuitive Comparison Between Controller and Input Unit

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

LIST OF TABLES

Table. 1-1 Input Shaping Time and Sensitivity of Input shaper

Table. 2-1 System Parameters of ZVD_{AL} and EI_{AL} shapers

Table. 3-1 System Parameter of ZVD_{AL} and EI_{AL} shaper

Table. 4-1 System Parameter of ZVD_{F} shaper

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

NOMENCLATURE

$G(s)$	Transfer function
$Y(s)$	Output
$U(s)$	Input
ζ	Damping ratio
ω	Natural frequency
T	Period
L	Suspension length
A_i	Amplitude of impulses
t_i	Time locations of impulses
v_t	Actual velocity profile
V_d	Desire velocity
κ_a	Acceleration
κ_d	Deceleration
τ_a	First Acceleration time constants
τ_b	Second Acceleration time constants
τ_c	Third Acceleration time constants
τ_d	First Deceleration time constants
τ_e	Second Deceleration time constants
τ_f	Third Deceleration time constants
θ_{ss}	Steady-state response
$g_i(t)$	Segments of actual velocity profile
$\lvert V \rvert$	Magnitude of vector
$\angle V$	Phase of vector
t_p	Pulse duration

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

ABSTRACT

Input Shaping Control and Remote Input Shaping Device

Kim, Myung-Soo
Advisor : Professor Sung, Yoon-Gyung, Ph. D.
Department of Mechanical Engineering
Graduate School of Chosun University

In this thesis, Input shaping commands are developed to reduce the transient and residual deflection of flexible systems and remote input shaping devices that can remotely control the system. Input Shaping technology is currently being applied to various flexible systems. However, due to the external environment at the actual site, theoretical input shaping techniques have low performance. So, input shaping techniques must take into account the various nonlinear dynamics that occur in the field. In addition, the most important aspect of the complex field is worker safety. However, to date, the operator performs dangerous tasks by touching various equipment. Therefore, new interfaces are needed that improve worker safety and task efficiency.

We discuss two examples in the field of nonlinear mechanics that take into account the limits of acceleration and the case of first-order. The response from each case was approximated and presented in the form of a Phasor vector and the vector diagram approach was used. In addition, remote input shaping devices to increase worker safety and task efficiency are based on Android. It also includes input shaping technology as well as display images of cameras and control cranes.

The new input shapers are evaluated with Pendulum systems to analyze residual deflection, robustness of system modeling. the remote input shaping device is evaluated to reduce experiment time and number of collisions. new input shapers and remote input shaping device are experimentally evaluated and verified with a mini-Bridge crane.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

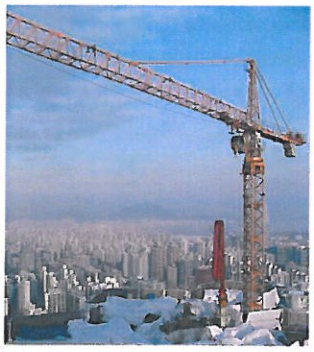
1. 서론

1.1 연구 필요성

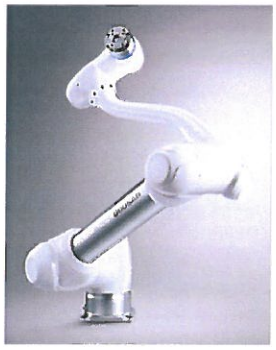
현재 reaction zet, piezo 구동기, 로봇, 크레인 등 다양한 유연시스템들이 실제 산업 현장에서 사용되고 있다. Fig. 1-1과 같은 유연시스템은 연료 절감과 효율성을 극대화하기 위해 힘의 크기를 늘리거나 속도를 증가하였다. 이에 따라 복잡한 산업 현장에서는 고중량 운반물과 운반속도에 의해서 작업자나 구조물의 사고 발생률이 증가하고 있다. 그러므로 잔류변위를 저감하여 산업 현장에서의 장애물의 위치와 그에 따른 이동 및 반응에 대한 유연성을 모두 포함한 제어가 필요하다. 또한 위 문제점의 다른 요소로는 작업자가 사용하는 인터페이스이다. 복잡한 산업현장에서 신속한 작업 속도와 안전한 제어가 가능한 인터페이스가 필요하다.

현재까지 payload의 잔류변위 저감을 위해 시스템의 주파수와 감쇠비를 이용한 input shaping technique를 활용되었다. 이때 선형 기반으로 설계된 입력성형제어 방법[1~5]은 실제 산업현장의 비선형 시스템[6~8]에 적용했을 때 잔류변위 저감 성능이 떨어진다. 그에 따라 system modeling error에 대한 강인성을 포함한 robust 입력성형제어기[9~10]가 개발되었지만 제어 시간이 증가되는 단점을 갖는다.

현재 산업현장에서는 모터나 모터 드라이버의 성능을 초과하는 가속도가 작용됐을



(a) 타워 크레인



(b) 로봇

(c) 좌표 측정기

Fig. 1-1 Flexible Systems

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

시 모터가 그 궤적에 대해 응답할 수 없으며 그러한 상태에서 사용 시 모터나 모터 드라이버의 제어성능이 저하한다. 그러므로 구동기의 가속도 제한을 고려한 입력성형제어 기술이 필요하다. 그리고 크레인 동작은 관성력 및 시스템의 전기적 특성으로 인해 비선형성이 나타난다. 이에 따라 입력성형제어기의 잔류진동 저감 성능을 극대화하기 위해 비선형 동적 특성을 고려한 연구가 필요하다. 또한 크레인의 조작을 위해 기존에는 pendant, joystick, control levers 등이 활용되었다. 위의 인터페이스는 작업자가 현장에 있어야만 조작이 가능하다는 한계와 작업자의 안전, 생산성을 저해하는 요소이다. 따라서 입력성형제어 방법을 적용시킴과 동시에 원격으로 크레인을 조작하는 인터페이스가 필요하다.

1.2 이론적 배경

현재까지 유연시스템의 잔류변위 저감을 위해 가장 많이 활용된 방법은 시스템의 주파수를 이용한 feed-forward technique 방법인 Input shaping technique이다. 이 방법은 입력 명령을 입력 성형기에 의해 적절히 성형하여 물리시스템에 입력이 가해질 때 발생하는 잔류 진동을 제거하는 open-loop 제어기법으로 잔류변위 또는 과도변위 저감, modeling error에 대한 강건성 증가, 음에 임펄스를 허용한 on-off 제어 등 다양한 제어

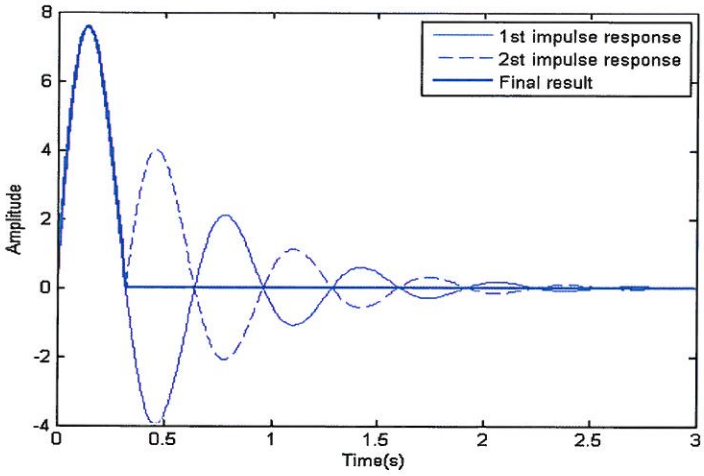


Fig. 1-2 Input Shaping Technique

Collection @ chosun

조선대학교 CHOSUN UNIVERSITY

방법들이 제안되어 왔다. 이때 입력성형제어기는 입력커맨드와 임펄스 시퀀스의 convolution을 통해 입력성형 커맨드를 생성하고 이에 따라 구동기로 출력하는 역할을 한다. Fig. 1-2는 입력성형의 기본원리를 나타낸 것으로 첫 번째 임펄스로부터 나타나는 응답과 두 번째 임펄스 간의 나타나는 응답이 t_2 이후에 서로 상쇄되어 시스템의 잔류 변위를 감소시킨다. 위의 Fig. 1-2은 감쇠비로 인해 점점 진동이 작아지지만 본 연구에서는 시스템의 변위를 저감하는데 장점으로 작용하는 damping을 0으로 한정한 비 감쇠 시스템을 설계하였다.

입력성형의 제약 조건을 계산하기 위하여 시스템의 전달함수를 이용하여 시스템의 응답을 나타내고 임펄스에 대한 응답 식을 구한다. 표준 2차 시스템의 전달함수는 식 (1.1)과 같이 나타난다.

$$G(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{\omega_n}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \tag{1.1}$$

식 (1.1)의 전달함수를 이용하여 단위 Impulse 응답 식은 식 (1.2)와 같이 나타난다.

$$y(t) = A\frac{\omega_n}{\sqrt{1-\zeta^2}} e^{-\zeta\omega_n(t-t_0)} \sin\left(\omega_n\sqrt{1-\zeta^2}(t-t_0)\right) \tag{1.2}$$

여기서 t_0는 임펄스 시간이다. 식 (1.2)는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\sum B_i \sin(\alpha t + \phi_i) = A_{amp} \sin(w_d t + \psi) \tag{1.3}$$

여기서, ω_d, ϕ_i 와 B_i는 다음과 같다.

$$\omega_d = \omega_n\sqrt{1-\zeta^2} \tag{1.4}$$

$$\phi_i = \omega_n\sqrt{1-\zeta^2}\, t_i \tag{1.5}$$

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

$$B_i = A_i \frac{\omega_n}{\sqrt{1-\zeta^2}} e^{-\zeta\omega_n(t_N - t_i)} \tag{1.6}$$

A_i 와 t_i 는 i 번째 가해지는 임펄스의 크기와 시간이고 t_N은 마지막 임펄스의 시간, ω_n은 시스템의 고유 진동수, ζ는 감쇠비이다. 식 (1.3)은 사인 공식에 의해 다음과 같이 나타난다.

$$\sqrt{\left(\sum_{i=1}^{n} B_i \sin\phi_i\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^{n} B_i \cos\phi_i\right)^2} \sin(\omega_d t + \psi) = A_{amp} \sin(\omega_d t + \psi) \tag{1.7}$$

여기서

$$\psi = \tan^{-1}\left(\frac{\sum_{i=1}^{n} B_i \cos\phi_i}{\sum_{i=1}^{n} B_i \sin\phi_i}\right) \tag{1.8}$$

위의 식 (1.7)에서 잔류진동의 크기를 0으로 갖기 위해서는 A_{amp}의 크기가 0이 되어야 한다. 이때 입력성형제어기를 통과한 임의의 명령이 구동기의 최대 성능을 넘지 않기 위해 식 (1.6)의 조건식을 사용한다.

$$\sum_{i=1}^{n} A_i = 1 \tag{1.9}$$

위의 제약 조건식을 사용하여 입력성형제어기의 기본 배경인 4가지 방법을 제시한다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

1.2.1 Zero Vibration(ZV) 입력성형제어기

Zero Vibration 입력성형제어기는 유연시스템의 잔류변위 저감을 위해 1985년 처음으로 Singer[1]가 개발하였다. 이 방법은 식 (1.7)으로부터 sin 항과 cos 항이 각각 0이 되는 조건을 활용하여 식 (1.10)과 (1.11)의 잔류변위식과 성능에 따른 제약조건 식 (1.9)을 이용하여 2개의 임펄스로 구성된 입력성형제어기이다.

$$\sum_{i=1}^{n} A_i e^{-\zeta\omega_n (t_N - t_i)} \sin(\omega_n t_i \sqrt{1-\zeta^2}) = 0 \tag{1.10}$$

$$\sum_{i=1}^{n} A_i e^{-\zeta\omega_n (t_N - t_i)} \cos(\omega_n t_i \sqrt{1-\zeta^2}) = 0 \tag{1.11}$$

Fig. 1-3은 ZV shaper의 단위 계단입력을 두 단계로 나누어 잔류변위를 제거한다. 임펄스의 크기와 시간은 식 (1.12)와 같다. 여기서 K는 $K = e^{-\zeta\pi/\sqrt{1-\zeta^2}}$이고 T는 시스템의 주기를 의미하며 $T = 2\pi/\omega_n$ 이다.

$$\begin{bmatrix} A_i \\ t_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dfrac{1}{1+K} & \dfrac{K}{1+K} \\ 0 & \dfrac{T}{2} \end{bmatrix} \tag{1.12}$$

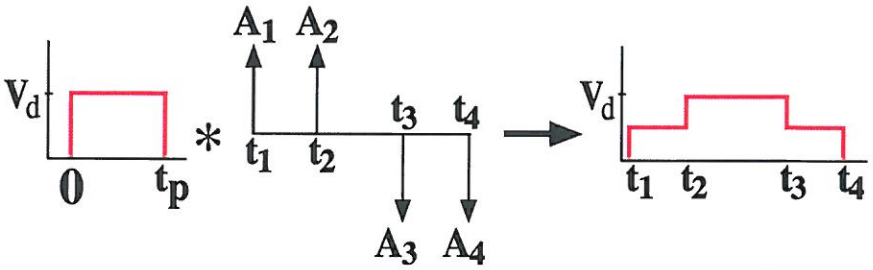


Fig. 1-3 Zero Vibration(ZV) shaper

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

1.2.2 Zero Vibration Derivate(ZVD) 입력성형제어기

Zero Vibration(ZV) shaper의 경우 설계 시 설정한 주파수와 감쇠비가 실제 시스템의 주파수 및 감쇠비가 일치하지 않거나 제어 도중 변화가 있을 시 발생되는 system modeling error에 대한 강인성이 미흡하여 잔류변위 저감의 높은 성능을 기대하기 어렵다. 이에 대해서 Singer는 impulse의 수를 증가시켜 system modeling error에 강인한 입력성형제어기를 개발하였다. 이때 Impulse의 수를 증가함에 따라 정상상태에 도달하는 시간이 증가하게 되는 단점이 있다. Zero Vibration Derivate[1] 입력성형제어기는 Fig. 1-4와 같이 단위 계단 입력을 세 단계로 나누어 잔류변위를 제거한다. 시스템 주파수의 변화에 강인한 입력성형제어기를 개발하기 위해 식 (1.10)과 식(1.11)을 ω_n에 대하여 미분하여 식 (1.13)과 (1.14)로 나타난다.

$$\sum_{i=1}^{n} A_i t_i e^{-\zeta\omega_n (t_N - t_i)} \sin(\omega_n t_i \sqrt{1-\zeta^2}) = 0 \tag{1.13}$$

$$\sum_{i=1}^{n} A_i t_i e^{-\zeta\omega_n (t_N - t_i)} \cos(\omega_n t_i \sqrt{1-\zeta^2}) = 0 \tag{1.14}$$

위의 식 (1.10), (1,11) (1.13), (1.14)을 동시에 만족하는 임펄스의 크기와 임펄스의 시간을 구하면 식 (1.15)로 나타난다. 여기서 K는 $K = e^{-\zeta\pi/\sqrt{1-\zeta^2}}$이고 T는 시스템의 주기를 의미하며 $T = 2\pi/\omega_n$ 이다.

$$\begin{bmatrix} A_i \\ t_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dfrac{1}{K^2+2K+1} & \dfrac{2K}{K^2+2K+1} & \dfrac{K^2}{K^2+2K+1} \\ 0 & \dfrac{T}{2} & T \end{bmatrix} \tag{1.15}$$

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

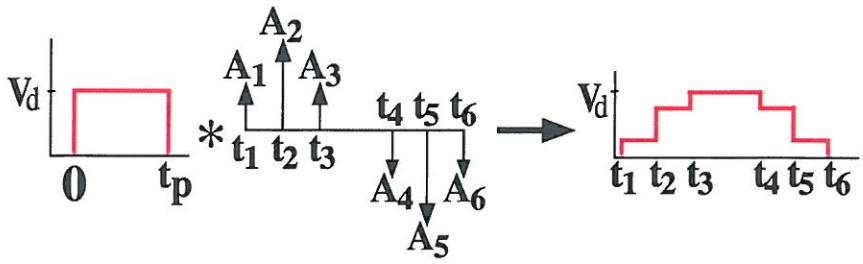


Fig. 1-4 Zero Vibration Derivate(ZVD) shaper

1.2.3 Extra Insensitivity(EI) 입력성형제어기

Extra Insensitivity shaper[2]는 Zero Vibration Derivate shaper 보다 system modeling error에 더욱 강인한 입력성형제어 방법으로 잔류 변위의 크기를 허용한다. EI shaper는 sensitivity curve에서 hump 형태로 나타내기 위해 $\theta_3 = 2\theta_2$의 조건식을 사용하였으며 일정 변위 내에서는 ZVD shaper 보다 강인한 특성을 보인다. system modeling error에 대해 강건함을 보이기 위해 EI shaper 또한 잔류변위 식에서 ω_n에 대해 미분하면 식 (1.16)의 조건식을 얻을 수 있다. 여기서 $V_{\lim}$ 입력성형방법이 적용되지 않은 unshape 잔류변위의 $V_{\lim}(\%)$를 의미한다.

$$|A_1| - |A_2| + |A_3| = V_{\lim}(|A_1| + |A_2| + |A_3|) \tag{1.16}$$

또한 sensitivity curve에서 $\omega/\omega_{sys} = 1$를 기준으로 낮은 고유진동수와 높은 고유진동수 영역에서 잔류변위의 크기를 0으로 만족시키는 식 (1.10), (1.11)과 잔류변위의 $V_{\lim}(\%)$ 식 (1.16)를 활용하여 일정한 변위를 허용하는 강건한 EI shaper의 임펄스의 크기와 시간은 식 (1.17)과 같다. 3개의 impulse를 단위 계단입력으로 나눈 EI shaper의 입력성형과정은 Fig. 1-5와 같다.

$$\begin{bmatrix} A_i \\ t_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{(1+V_{\lim})}{4} & \frac{(1-V_{\lim})}{2} & \frac{(1+V_{\lim})}{4} \\ 0 & \frac{T}{2} & T \end{bmatrix} \tag{1.17}$$

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

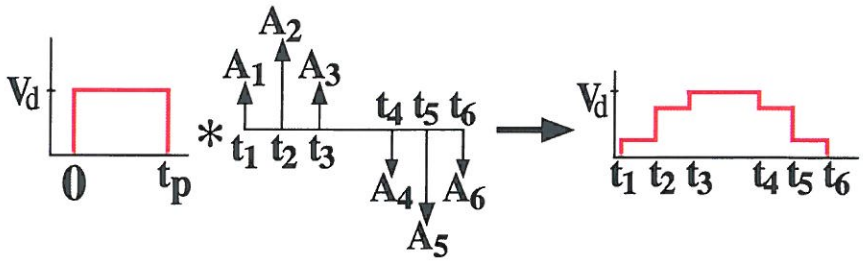


Fig. 1-5 Extra Insensitivity(EI) shaper

1.2.4 Unit Magnitude Zero Vibration(UMZV) 입력성형제어기

Unit Magnitude Zero Vibration[3]은 산업현장의 생산성을 저감하는 요인인 시간을 단축함과 동시에 on-off 형태의 구동기를 위하여 음의 입력을 허용한 입력성형제어방법으로 이전의 식 (1.10), (1.11)을 이용하여 잔류변위의 합을 0이 되는 조건과 식 (1.18)을 제약 조건으로 사용한다.

$$A_i = (-1)^{i+1} \tag{1.18}$$

기본 shaper 중 입력성형이 완료되는 시점이 가장 빠르며 Fig. 1-6의 그림과 같이 세 개의 impulse를 단위 계단입력으로 나누어 표현된다. UMZV shaper의 임펄스의 크기와 임펄스 시간은 식 (1.19)과 같다.

$$\begin{bmatrix} A_i \\ t_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 1 \\ 0 & \frac{T}{6} & \frac{T}{3} \end{bmatrix} \tag{1.19}$$

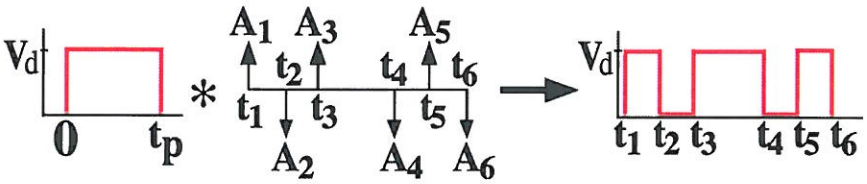


Fig. 1-6 Unit Magnitude Zero Vibration(UMZV) shaper

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

1.2.5 기본 입력성형제어기 평가

이전의 4가지 shaper의 임펄스 크기와 임펄스 시간을 이용하여 시간에 따른 잔류변위의 크기와 system modeling error에 대한 강건성을 평가한다. Fig. 1-7은 시간에 따른 잔류변위의 크기를 나타낸 그림으로 UMZV shaper가 잔류변위 저감하는데 있어 가장 작은 시간이 걸렸으며 ZV shaper가 그 다음으로 작은 시간이 나타났으며 ZVD, EI shaper가 가장 느린 시간이 나타난다.

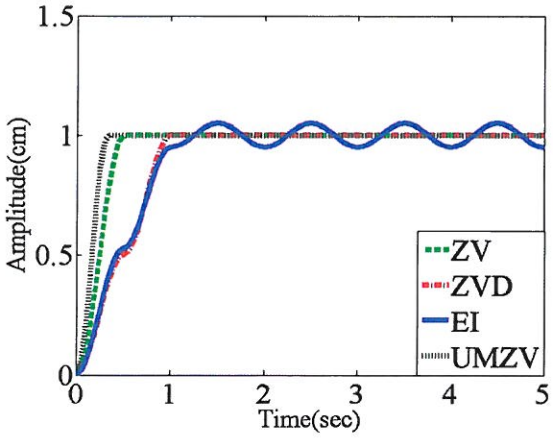


Fig. 1-7 Time response of input shaper

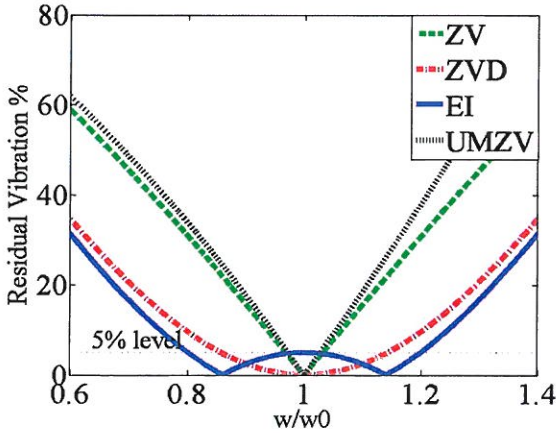


Fig. 1-8 Sensitivity of input shaper

Collection @ chosun

조선대학교 CHOSUN UNIVERSITY

Table. 1-1 Input shaping time and sensitivity of input shaper

	ZV shaper	ZVD shaper	EI shaper	UMZV shaper
Input shaping 시간	$\frac{T}{2}$	T	T	$\frac{T}{3}$
강건성	낮음	높음	가장 높음	가장 낮음

입력성형제어기를 평가함에 있어 시간 단축 또한 중요한 요소이다. 하지만 시간 단축으로 인하여 발생되는 문제점을 다음 그림 Fig. 1-8에서 나타난다.

Fig. 1-8은 system modeling error에 대한 강건성을 나타낸 그림이다. 이때 강건성이란 시스템 모델링 오류에서 5%를 기준할 때 그 미만을 말한다. EI shaper가 가장 강건함이 나타나며 ZVD shaper가 다음으로 강건함이 높으며 ZV shaper와 UMZV shaper가 가장 낮게 나타났다. Fig. 1-7과 비교하였을 때 반대의 결과를 얻을 수 있었다. ZV, UMZV shaper는 입력성형의 시간이 단축하였지만 강건성 부분에서는 낮은 성능을 보였다. 이와 반대로 ZVD, EI shaper는 입력성형의 시간이 지연되었지만 강건성 부분에서 높은 성능을 보였다. Table. 1-1은 기본 shaper의 입력 성형이 완료되는 시간과 시스템 모델링 오류에 따른 강건성을 비교한 것이다. Fig. 1-7과 Fig. 1-8에 나타난 것과 같으며 이의 4개의 기본 shaper의 분석 개발 절차를 확장하여 비이상적인 구동기로 다양한 명령을 생성할 수 있다.

1.3 연구 목적 및 논문 구성

1.2절에서 언급한 4가지의 기본 입력성형제어기는 모두 linear 기반 구동기에 대한 솔루션들이다. 하지만 실제 산업 현장의 비선형 구동기는 잔류변위를 발생시키고 입력성형제어기의 성능이 저하된다. 따라서 실제 산업 현장에서 비선형 시스템의 동적 특성을 고려함과 동시에 system modeling error에 대해 강건한 입력성형제어기가 필요하다. 또한 기존의 산업현장에서 사용하는 pendant, joystick등의 interface 한계점과 작업자의 안전, 작업의 정확도, 작업의 효율성을 고려한 interface가 필요하다.

현재 대부분의 구동기는 모터드라이브와 모터 자체의 성능으로 인하여 최대 가속도를 제한하는 경우가 많다. 또한 모터의 성능에 따라 비선형 dynamics로 나타난다. 따라서 2장에서는 기존의 linear 기반의 해석 해를 이용하고 pendulum system의 가속도 제한을 고려한 전달함수를 이용하여 정상상태 응답식을 구하여 phasor form의 벡터로 나타내고 이

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

를 vector diagram approach을 이용하여 가속도 제한을 고려한 강건한 해석 해를 제시한다. 3장에서는 기존의 linear 기반의 해석 해를 이용하고 pendulum system의 1st-order를 고려한 전달함수를 이용하여 정상상태 응답식을 구하여 phasor form의 벡터로 나타내고 vector diagram approach를 이용하여 구동기의 비선형 dynamics를 고려한 강건한 해석 해를 제시한다. 위의 각각의 제시한 입력성형제어기를 이용하여 잔류변위 크기 및 강건성을 numerical simulation을 통해 평가하고 mini-bridge crane을 이용한 실험을 통해 sensitivity 및 잔류변위저감 성능을 검증한다. 4장에서는 영상 센서를 이용하여 실시간 영상을 출력하고 libnodave library를 통해 SIEMENS PLC와 데이터를 송/수신하여 잔류변위를 저감하고 크레인을 제어하는 android 기반의 터치형 원격 입력성형제어장치를 제시한다. 제시한 터치형 원격입력장치를 이용하여 신속성과 직관성을 평가하고 mini-bridge crane을 이용한 장애물 경로 실험을 통해 잔류변위 저감과 작업속도 및 정확성을 검증한다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2장. 가속도가 제한된 비선형 구동기에 대한 강건 입력성형제어기

본 논문은 유연계의 가속도 제한을 고려한 강건 입력성형제어기를 제시한다. 실제 산업현장에서 linear 기반의 square 형태 속도 프로파일을 이용한 입력성형제어방법은 시스템의 잔류변위를 발생시키고 입력성형제어기의 성능을 저하시킨다. 따라서 ZVD 입력성형제어기를 기반으로 구동기의 가속도 제한을 고려한 속도 프로파일을 비선형 구동기의 동적 특성에 대한 응답으로 근사화하여 phasor form 형태의 벡터로 나타내고 이를 vector diagram approach를 이용하여 exact solution을 제시한다. 제시한 강건 입력성형제어기를 이용하여 잔류변위, 강건성을 numerical simulation을 통해 평가 및 검증한다. 가속도 제한을 고려한 강건 입력성형제어기는 mini-bridge crane을 이용한 실험을 통해 잔류변위저감 성능 및 sensitivity을 검증한다.

2.1 서론

현재 reaction zet, piezo 구동기, 크레인 등 유연시스템은 산업현장에서 생산성, 안전성 등 다양한 영향을 미치고 있다. 그러므로 산업현장에서 작업 효율을 높이기 위한 이동과 위치에 관한 제어는 상당히 중요하다. 입력성형제어 방법은 물체의 이동과 이동이 끝난 후의 변위를 저감하여 유연시스템에서 발생되는 잔류변위를 저감하는 효과적인 방법이다. 이때 산업현장의 외부적인 요소들로 인하여 system modeling error에 따른 잔류변위저감 성능이 감소한다. 또한 현재 산업현장에서는 모터나 모터 드라이버의 성능을 초과하는 가속도가 작용됐을 시 모터가 그 궤적에 대해 응답할 수 없으며 그러한 상태에서 사용 시 모터나 모터 드라이버의 제어 성능이 떨어지므로 가속도를 제한하는 경우가 많다. 가속도가 제한된 구동기에 기존의 이상적인 square 형태의 속도 프로파일을 이용한 입력성형방법이 적용됐을 시 잔류변위가 발생하여 성능이 저하된다. 그러므로 구동기의 가속도 제한을 고려한 ramp 형태의 속도 프로파일을 이용하고 이와 동시에 system modeling error에 대한 강건한 입력성형제어방법을 요구한다.

산업 현장에서 시스템의 오차에 대한 강건 입력성형제어기에 관한 연구들이 계속 진행되어 왔다. Singer는 시스템의 고유주파수 오차에 대한 강건성을 위하여 Zero

Collection @ chosun

조선대학교 CHOSUN UNIVERSITY

Vibration(ZV) 입력성형제어기의 고유주파수를 미분한 식을 이용하여 3개의 임펄스 형태의 Zero Vibration Derivate(ZVD)[1] 입력성형제어기를 개발하였다. 또한 Singhose, Seering과 Singer는 잔류변위 식을 잔류변위 벡터로 나타내어 Vector Diagram Approach[4~5]를 활용한 hump 형태의 일정 변위를 허용하는 강건한 Extra Insensitivity(EI)[2] 입력성형제어기를 제시하였다. EI shaper의 경우 원하는 잔류변위를 허용하는 대신 강건성을 향상시킨 것으로 기존의 ZVD shaper보다 system modeling error에 대해 더 강건함을 보인다. 위의 두 입력성형제어기는 system modeling error에 대해서는 강건함을 보이지만 가속도 제한이 고려되지 않아 실제 산업현장에서 활용 시 잔류변위의 성능이 기대했던 만큼 나타나지 않는다.

실제 산업현장 유연시스템의 비선형 구동기를 고려한 연구들도 현재까지 계속 진행중에 있다. Lawrence[6]와 Singhose는 선형 입력성형제어기에 비선형 구동기의 영향으로 발생되는 가속도 및 감속도에 의한 시간지연을 고려하여 closed-form에서의 solution과 optimization 방법을 사용하여 비선형 입력성형 제어기를 제시하였다. Sorensen[7]은 비선형시스템으로 인한 입력성형제어기의 성능감소에 대하여 deconvolution 방법을 이용한 입력성형제어기의 성능분석방법을 제시하였다. Kinceler와 Meckl[8]는 비선형시스템의 point-to-point 이동을 위해 inverse dynamics 및 open-loop optimal formulation을 통해 time-varying 고유주파수에 대한 입력 커맨드를 생성하는 방법을 제시하였다. Danielson[11]은 nonlinear dynamics를 kinematic formulation을 통하여 구한 linearized system에 대해 기존의 입력성형제어방법을 평가하였다. Danielson[12]은 구동기의 가속도 제한을 고려하여 optimization 방법을 제시하였다. Singhose, Derezinski와 Singer[13]는 reaction jet 시스템에서 잔류 변위의 식을 이용하여 sensitivity curve의 hump 형태의 강건성을 향상시킨 EI shaper를 optimization 방법을 이용하여 제시하였다. 하지만 optimization 방법을 실제 시스템에 적용하는데 계산 시간이 많이 걸리기 때문에 실제 적용하는데 있어서 다소 어려움이 있다.

따라서 실제 산업현장의 모터드라이브와 모터 자체의 성능으로 인하여 생기는 최대 가속도를 고려한 강건 입력성형제어기를 제시한다. 2절에서는 가속도를 제한하는 pendulum system의 정상상태 응답식을 통해 phasor form으로 나타내고 vector diagram approach를 적용하여 Zero Vibration Derivate acceleration limits(ZVD_{AL})과 잔류변위의 허용을 포함하는 hump 형태의 입력성형제어기인 Extra Insensitivity acceleration limits(EI_{AL})를 제시한다. 3절에서는 앞에서 제시한 입력성형제어 방법의 잔류 진동 크기와 shaper의 설계 변수에 따른 shaper의 완성도 그리고 강건성에 대해 평가한다. 4절에서는 제시

Collection @ chosun

조선대학교 CHOSUN UNIVERSITY

한 입력성형제어기를 mini-Bridge Crane을 통해 sensitivity와 residual vibration 실험 결과를 통해 검증한다.

2.2 Robust Acceleration Limit Input Shaper Development

linear 기반의 이상적인 속도 프로파일을 이용한 강건 입력성형제어기 ZVD shaper와 EI shaper는 가속도가 제한된 구동기에 적용되었을 때 잔류변위를 발생시키고 입력성형제어의 성능을 저하시킨다. 그러므로 가속도가 제한되어 있는 구동기의 system modeling error에 대한 강건 입력성형제어기 ZVD_{AL} shaper와 EI_{AL} shaper를 제시한다. pendulum system의 가속도 제한을 고려한 전달함수를 이용하여 정상상태 응답 식을 구하고 phasor vector 형태로 나타내어 잔류변위에 대한 변위 벡터를 나타낸다. ZVD_{AL} shaper의 경우 벡터의 합이 0, EI_{AL} shaper의 경우 벡터의 합을 허용 잔류변위의 크기로 설정하여 가속도 제한을 고려한 강건 입력성형제어기를 제시한다.

2.2.1 가속도 제한을 고려한 ZVD_{AL} 입력성형제어기

ZVD_{AL} shaper는 강건한 입력 성형 커맨드를 생성하기 위해 ZVD shaper를 기반으로 개발하였다. ZVD shaper[1]는 다음과 같이 간략하게 요약된다.

$$\begin{bmatrix} A_i \\ t_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{K^2+2K+1} & \frac{2K}{K^2+2K+1} & \frac{K^2}{K^2+2K+1} \\ 0 & \frac{T}{2} & T \end{bmatrix} \tag{2.1}$$

여기서 T는 유연시스템의 주기, $K=e^{-\zeta\pi/\sqrt{1-\zeta^2}}$이다. 이때 $\zeta=0$인 경우에 대한 ZVD_{AL} shaper를 설계하였다. ZVD shaper는 계단 입력과 임펄스 시퀀스의 convolution을 통해 세 개의 계단 입력 명령 프로파일로 나타나며 Fig. 2-1의 이상적인 구동기를 갖춘 유연시스템에 적용되는 경우 잔류변위의 크기를 0으로 만든다. 여기서 ZVD shaper의 입력 명령이 가속 및 감속이 제한된 구동기를 갖춘 유연시스템에 적용되는 경우 Fig. 2-1과 같이 왜곡된 명령으로 인해 제어 성능이 저하된다. 따라서 구동기의 가속도 및 감속도가 동일하지 않은 것을 고려하여 강건한 입력 프로파일 명령이 필요하다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

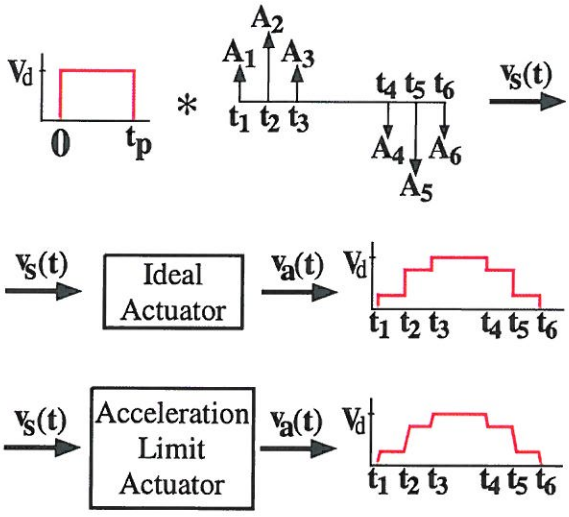
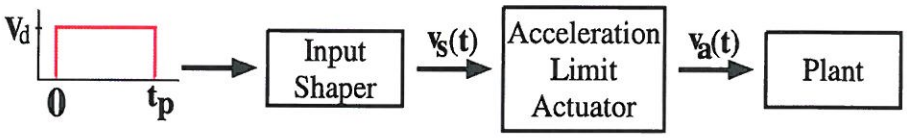


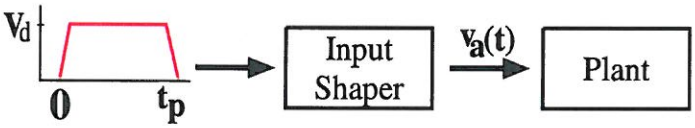
Fig. 2-1 Actuator effects to an ZVD shaper

명령 설계 절차는 Fig. 2-2와 같이 ramp 형태의 입력 명령으로 변환하여 단순화 될 수 있다. 가속도를 제한하는 shaper의 공식은 식 (2.2)의 조건을 만족함과 동시에 사용할 수 있다.

$$t_{i+1} - t_i \geq \frac{A_i V_d}{\kappa_i} \quad (A_i\text{가 양수일때}\kappa_a,\ \text{음수일때}\kappa_d) \tag{2.2}$$



(a) Original command process



(b) Equivalent command process

Fig. 2-2 Equivalent transformation

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

여기서 A_i 와 t_i는 임펄스의 크기와 임펄스 시간, V_d는 원하는 속도, κ_a는 가속도, κ_d는 감속도이다. 이상적인 ZVD shaper 및 시스템의 주기를 고려하여 위의 조건을 만족하면 ramp 형태의 프로파일을 가지는 pendulum system의 phasor vector diagram을 활용하여 분석적인 접근 방식을 제시할 수 있다.

phasor vector diagram 접근법을 사용하기 위해 Fig. 2-3에 도시 된 입력 성형 기술 개발의 일반성을 유지하면서 대표적인 유연시스템인 pendulum system을 활용한다.

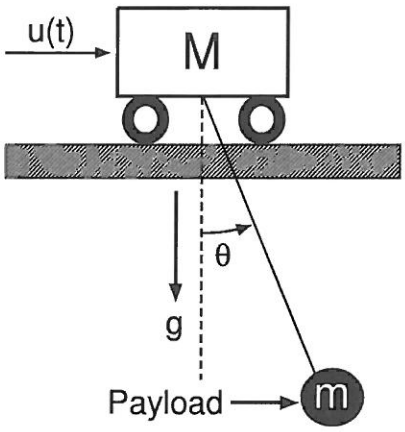


Fig. 2-3 Pendulum system

pendulum System에 대한 하중을 모델링한 방정식은 식 (2.3)과 같이 표현되며 풀이과정은 Appendix A.1과 같다.

$$L\ddot{\theta}(t) + gsin\theta(t) = u(t)\cos\theta(t) \tag{2.3}$$

여기서 $u(t) = \dot{v}_a(t)$ 로 속도 입력 명령이고, L은 시스템 줄 길이 그리고 g는 중력 가속도를 말한다. 이때 $\theta(t)$를 미소 각도로 가정하면, 식 (2.3)은 laplace transform 하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\theta(s) = G_p(s)\,V_a(s) = -\frac{s\,V_a(s)}{L}\frac{1}{s^2+\omega_n^2} \tag{2.4}$$

Collection @ chosun

조선대학교 CHOSUN UNIVERSITY

여기서 ω_n은 pendulum system의 고유 진동수이고 $V_a(s)$는 $v_a(t)$를 laplace transform한 것이다. 시스템의 출력 $\theta(s)$는 phasor 형태로 나타내기 위해 시스템 입력 $H(s)$와 sine input 형태로 나타내면 다음과 같다.

$$\theta(s) = \underbrace{-\frac{s.V_a(s)}{L\omega_n}}_{H(s)} \cdot \underbrace{\frac{\omega_n}{s^2+\omega_n^2}}_{Sine\ Input} \tag{2.5}$$

잔류 진동에서 입력 성형 방법의 핵심은 식 (2.5)로부터 정상상태 응답 식을 다음과 같이 표현하는 것이다.

$$\theta_{ss}(t) = \frac{|V_a(j\omega_n)|}{L} sin\left(\omega_n t - \frac{\pi}{2} + \angle V_a(j\omega_n)\right) \tag{2.6}$$

식 (2.6)에서 잔류 진동이 없으면, $\theta_{ss}(t)$의 크기는 0이어야 한다. 따라서 $|V_a(j\omega_n)|$은 Fig. 2-4 (b)와 같이 input shaper의 임펄스 시간에 대한 분할된 명령에 의해 결정될 수 있다. 전체 속도 프로파일은 다음과 같이 표현된다.

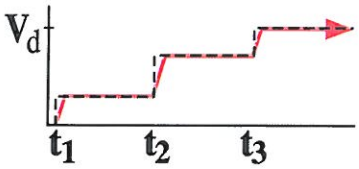
$$v_a(t) = \sum_{i=1}^{3} h_i(t) * \delta(t - t_i) \tag{2.7}$$

여기서 $h_i(t)$는 Fig. 2-4의 각 영역의 함수이며 구동기의 불균등 가속 및 감속을 다음과 같이 처리하는 ramp 형태의 함수로 근사화된다.

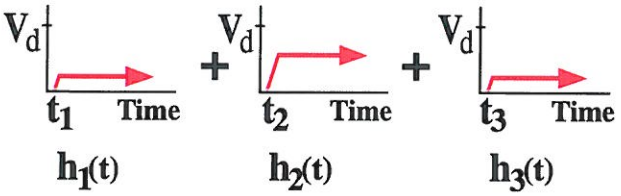
$$h_i(t) = \kappa_i t - \left(\kappa_i\left(t - \frac{A_i V_d}{\kappa_i}\right) * \delta\left(t - \frac{A_i V_d}{\kappa_i}\right)\right) \tag{2.8}$$

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



(a) Range division



(b) Segmented profiles

Fig. 2-4 Segmentation of a start command

여기서 속도 기울기 κ_i는 가속도 또는 감속도에 따라 결정되고 V_d는 구동기의 최대 속도가 될 수 있는 원하는 속도이다.

식 (2.7)과 (2.8)을 라플라스 변환하고 식 (2.6)의 phasor 형태를 활용함으로써 각 영역의 명령 벡터는 다음과 같이 얻어진다.

$$\overrightarrow{V_1}=\left|\frac{2\kappa_a\sin\left(\frac{A_1 V_d\omega_n}{2\kappa_a}\right)}{L\omega_n^2}\right|\angle\left[\omega_n t_1+\frac{A_1 V_d\omega_n}{2\kappa_a}\right] \tag{2.9}$$

$$\overrightarrow{V_2}=\left|\frac{2\kappa_a\sin\left(\frac{A_2 V_d\omega_n}{2\kappa_a}\right)}{L\omega_n^2}\right|\angle\left[\omega_n t_2+\frac{A_2 V_d\omega_n}{2\kappa_a}\right] \tag{2.10}$$

$$\overrightarrow{V_3}=\left|\frac{2\kappa_a\sin\left(\frac{A_3 V_d\omega_n}{2\kappa_a}\right)}{L\omega_n^2}\right|\angle\left[\omega_n t_3+\frac{A_3 V_d\omega_n}{2\kappa_a}\right] \tag{2.11}$$

ZVD_{AL} shaper를 설계함에 있어 ω에 대하여 미분하였을 때 implicit form으로 나타나 exact solution을 구할 수 없다. Fig. 2-5는 강건한 입력성형 제어기인 ZVD shaper와

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

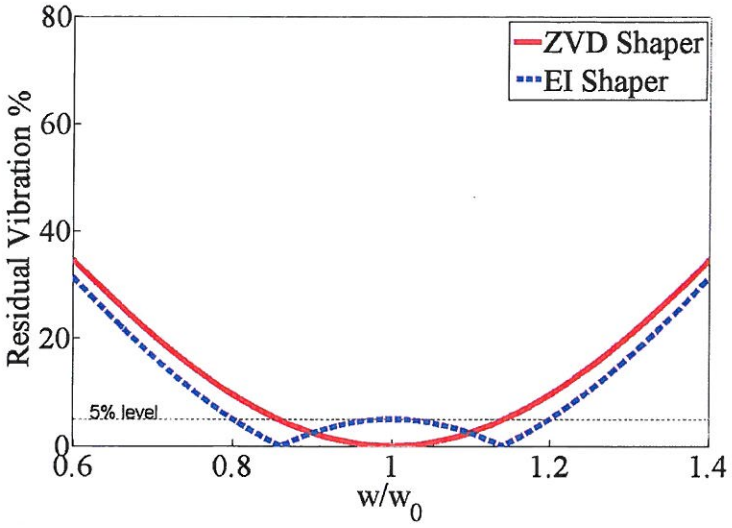


Fig. 2-5 Sensitivity of ZVD shaper and EI shaper

EI shaper의 임펄스 크기가 잔류변위에 미치는 영향을 보여준다. system modeling error가 없을 때 EI shaper의 경우 잔류변위가 허용되지만 ZVD shaper의 경우 잔류변위가 0이 나타난다. ZVD_{AL} shaper의 경우 잔류변위가 0이 되어야 하므로 A_1, A_2, A_3는 기존의 ZVD shaper의 크기로 가정하였다. 식 (2.9)에 대하여 각 명령 벡터를 정규화 하면, phasor vector는 다음과 같이 표현된다.

$$\overrightarrow{V_1} = |1| \angle [0] \tag{2.12}$$

$$\overrightarrow{V_2} = |\mu| \angle \left[\omega_n t_2 + \frac{V_d \omega_n}{8\kappa_a} \right] \tag{2.13}$$

$$\overrightarrow{V_3} = |1| \angle [\omega_n t_3] \tag{2.14}$$

여기서

$$\mu = \sin\left(\frac{V_d \omega_n}{4\kappa_a}\right) / \sin\left(\frac{V_d \omega_n}{8\kappa_a}\right) \tag{2.15}$$

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

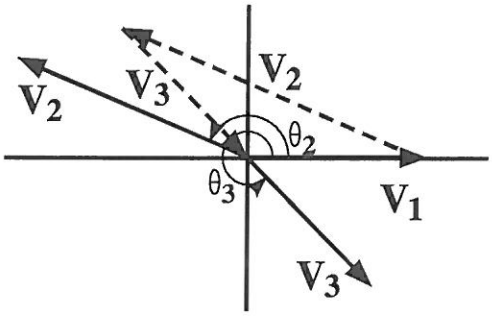


Fig. 2-6 Vector Diagram of an ZVD_{AL} shaper

위의 정규화 된 phasor vector식은 vector diagram에서 사용될 수 있다. 가속도 제한을 고려한 ZVD_{AL} shaper의 잔류변위의 크기는 Fig. 2-6에서 세 벡터의 합에 의해 결정된다. 위의 Fig. 2-6에서 $|\overrightarrow{V_1}|$ 벡터와 점선 $|\overrightarrow{V_2}|$ 벡터의 사잇각을 α, $|\overrightarrow{V_1}|$ 벡터와 점선 $|\overrightarrow{V_3}|$ 벡터의 사잇각을 β라고 할 때 cosine law를 활용하여 결정된 α, β는 다음과 같다.

$$\alpha = \cos^{-1}\left(\frac{|\overrightarrow{V_1}|^2 + |\overrightarrow{V_2}|^2 - |\overrightarrow{V_3}|^2}{2|\overrightarrow{V_1}||\overrightarrow{V_2}|}\right) = \cos^{-1}\left(\frac{\sin\left(\frac{V_d\omega_n}{4\kappa_a}\right)}{\sin\left(\frac{V_d\omega_n}{8\kappa_a}\right)}\right) \tag{2.16}$$

$$\beta = \cos^{-1}\left(\frac{|\overrightarrow{V_1}|^2 + |\overrightarrow{V_3}|^2 - |\overrightarrow{V_2}|^2}{2|\overrightarrow{V_1}||\overrightarrow{V_3}|}\right) = \cos^{-1}\left(1 - 2\cos^2\left(\frac{V_d\omega_n}{8\kappa_a}\right)\right) \tag{2.17}$$

Fig. 2-6과 식 (2.13), (2.14)을 활용한 벡터의 위상각은 $\theta_2 = \omega_n t_2 + \frac{V_d\omega_n}{8\kappa_a} = \pi - \alpha$, $\theta_3 = \omega_n t_3 = \pi + \beta$로 나타낼 수 있으며 이를 이용한 임펄스 시간 t_2와 t_3는 다음과 같이 결정된다.

$$t_2 = \frac{1}{w_n}\left(\pi - \frac{\omega_n V_d}{4\kappa_a}\right) \tag{2.18}$$

Collection @ chosun

조선대학교 CHOSUN UNIVERSITY

$$t_3 = \frac{1}{w_n}\left\{\pi + \cos^{-1}\left[1 - 2\cos^2\left(\frac{V_d\omega_n}{8\kappa_a}\right)\right]\right\} \tag{2.19}$$

이때 임펄스 시간 t_i 는 실수가 되어야 하고, $\cos^{-1}$ 함수에 양수가 필요하다. 정지 동작에 대한 switch time은 시작 동작과 같은 절차를 갖으며, 임펄스 크기의 부호는 비대칭 적으로 변경된다. 정지 동작에 대한 t_5와 t_6는 다음과 같이 표현된다.

$$t_5 = t_4 + \frac{1}{w_n}\left(\pi - \frac{\omega_n V_d}{4\kappa_a}\right) \tag{2.20}$$

$$t_6 = t_4 + \frac{1}{w_n}\left\{\pi + \cos^{-1}\left[1 - 2\cos^2\left(\frac{V_d\omega_n}{8\kappa_a}\right)\right]\right\} \tag{2.21}$$

여기서 $t_4 = t_p$ 로 pulse duration을 의미하며 시작 동작의 지속시간을 의미한다. 이때 ZVD_{AL} shaper의 잔류 변위 성능의 효과를 검증하기 위해서는 식 (2.22)의 제약조건을 만족해야 한다.

$$t_p \geq t_3 + \frac{A_3 V_d}{\kappa_a} \tag{2.22}$$

식 (2.22)을 만족하면, ZVD_{AL} shaper는 비대칭 가속 및 감속이 있는 구동기를 가지는 유연시스템에서 잔류변위 감소에 성능이 나타난다. 식 (2.18)~(2.21)를 활용해 유연 시스템의 시작 및 정지 명령에 대한 ZVD_{AL} shaper는 다음과 같이 표시된다.

$$\begin{bmatrix} A_i \\ t_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.25 & 0.5 & 0.25 & -0.25 & -0.5 & -0.25 \\ 0 & t_2 & t_3 & t_p & t_5 & t_6 \end{bmatrix} \tag{2.23}$$

위의 식 (2.23)은 강건한 입력 명령에 대한 convolution에 의해 비대칭 가속 및 제동이 있는 구동기를 사용하여 ramp 형태의 명령을 생성하는 데 사용된다. ZVD_{AL} shaper의 분석 개발 절차를 확장하여 비이상적인 구동기로 다양한 명령을 생성할 수 있다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

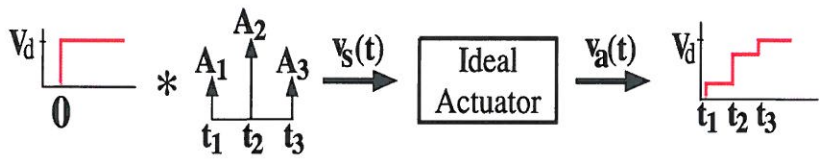
2.2.2 가속도 제한을 고려한 EI_{AL} 입력성형제어기

EI_{AL} shaper는 잔류 변위를 허용함과 동시에 강건한 입력 성형 커맨드를 생성하기 위해 EI shaper를 기반으로 개발하였다. EI shaper[2]는 다음과 같이 간략하게 요약된다.

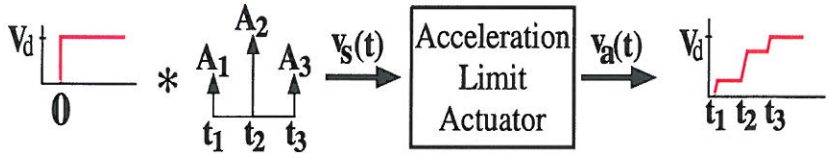
$$\begin{bmatrix} A_i \\ t_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1+V_{\lim}}{4} & \frac{1-V_{\lim}}{2} & \frac{1+V_{\lim}}{4} \\ 0 & \frac{T}{2} & T \end{bmatrix} \tag{2.24}$$

여기서 T는 유연시스템의 주기이고, $V_{\lim}$ 은 입력성형방법이 적용되지 않은 unshaped 에서의 잔류변위 크기의 퍼센트(%)이다. EI shaper는 계단 입력과 임펄스 시퀀스의 convolution을 통해 세 개의 계단 입력 명령 프로파일로 나타나며 이상적인 유연시스템의 잔류 진동을 $V_{\lim}$(%) 만큼의 크기를 갖는다.

이때 $\zeta = 0$ 경우에 대한 EI_{AL} shaper를 설계하였다. 이상적인 EI shaper의 입력 프로파일은 Fig. 2-7 (a)와 같은 프로파일 형태로 나타난다. 그러나 가속 및 감속이 제한된 구동기를 갖춘 유연시스템에 적용되는 경우 Fig. 2-7 (b)와 같이 왜곡된 명령으로 인해 제어 성능이 저하된다. 따라서 구동기의 가속도 및 제동 지연이 동일하지 않은 것을 고려하여 강건한 입력 모양의 명령이 추가로 필요하다.



(a) Ideal Actuator

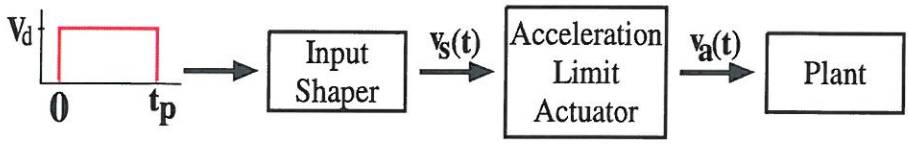


(b) Acceleration Limit Actuator

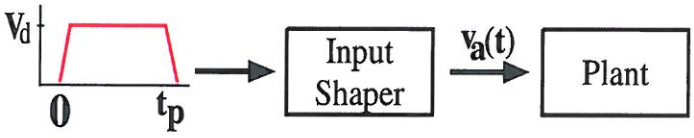
Fig. 2-7 Actuator effects to an EI shaper

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



(a) Original command process



(b) Equivalent command process

Fig. 2-8 Equivalent transform

명령 설계 절차는 Fig. 2-8와 같이 ramp 형태의 입력 명령으로 변환하여 단순화 될 수 있다. 가속도를 제한하는 shaper의 공식은 식 (2.25)의 조건을 만족함과 함께 사용할 수 있다.

$$t_{i+1} - t_i \geq \frac{A_i V_d}{\kappa_i} \quad (A_i\text{가 양수일때}\kappa_a,\ \text{음수일때}\kappa_d) \tag{2.25}$$

여기서 A_i 와 t_i는 임펄스의 크기와 임펄스 시간, V_d는 원하는 속도, κ_a는 가속도, κ_d는 감속도이다. 이상적인 EI shaper 및 시스템의 주기를 고려하여 위의 조건을 만족하면 ramp 형태의 프로파일을 가지는 pendulum system의 phasor vector diagram을 활용하여 분석적인 접근 방식을 제시할 수 있다.

phasor vector diagram 접근법을 사용하기 위해 Fig. 2-3에 도시 된 입력 성형 기술 개발의 일반성을 유지하면서 대표적인 유연시스템인 pendulum system을 활용한다. pendulum system에 대한 하중을 모델링한 방정식은 식 (2.26)과 같이 표현되며 풀이과정은 Appendix A.1과 같다.

$$L\ddot{\theta}(t) + g sin\theta(t) = u(t)\cos\theta(t) \tag{2.26}$$

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

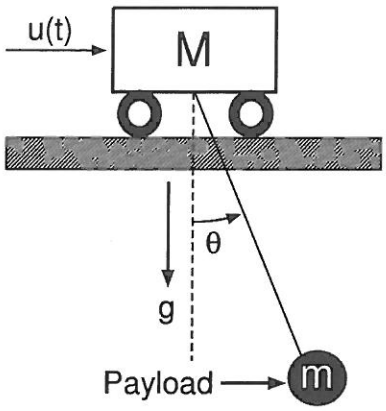


Fig. 2-9 Pendulum System

여기서 $u(t) = \dot{v}_a(t)$ 로 속도 입력 명령이고, L은 시스템 줄 길이 그리고 g는 중력 가속도를 말한다. 이때 $\theta(t)$를 미소 각도로 가정하고 laplace transform하여 다음과 같다.

$$\theta(s) = G_p(s)\,V_a(s) = -\frac{s\,V_a(s)}{L}\frac{1}{s^2+\omega_n^2} \tag{2.27}$$

여기서 ω_n은 pendulum system의 고유 진동수이고 $V_a(s)$는 $v_a(t)$를 laplace transform한 것이다. 시스템의 출력 $\theta(s)$는 phasor 형태로 나타내기 위해 시스템 입력 $H(s)$와 sine input 형태로 나타내면 다음과 같다.

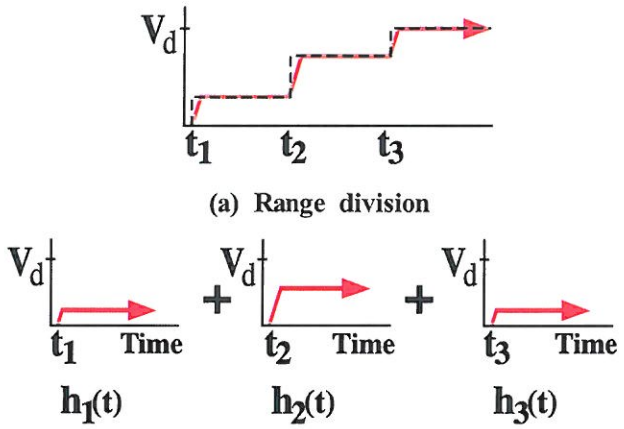
$$\theta(s) = \underbrace{-\frac{s.V_a(s)}{L\omega_n}}_{H(s)}\cdot\underbrace{\frac{\omega_n}{s^2+\omega_n^2}}_{Sine\ Input} \tag{2.28}$$

잔류 진동에서 입력 성형 방법의 핵심은 식 (2.28)로부터 정상 상태 응답식을 다음과 같이 표현하는 것이다.

$$\theta_{ss}(t) = \frac{|V_a(j\omega_n)|}{L}sin\left(\omega_n t - \frac{\pi}{2} + \angle V_a(j\omega_n)\right) \tag{2.29}$$

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



(a) Range division

(b) Segmented profiles

Fig. 2-10 Segmentation of a start command

식 (2.29)에서 잔류 진동이 없으면, $\theta_{ss}(t)$의 크기는 0이어야 한다. 따라서 $|V_a(j\omega_n)|$은 Fig. 2-10 (b)와 같이 input shaper의 임펄스 시간에 대한 분할된 명령에 의해 결정될 수 있다. 전체 속도 프로파일은 다음과 같이 표현된다.

$$v_a(t) = \sum_{i=1}^{3} h_i(t) * \delta(t - t_i) \tag{2.30}$$

여기서 $h_i(t)$는 Fig. 2-10의 각 영역의 함수이며 구동기의 불균등 가속 및 제동 지연을 다음과 같이 처리하는 ramp 형태의 함수로 근사화된다.

$$h_i(t) = \kappa_i t - \left(\kappa_i\left(t - \frac{A_i V_d}{\kappa_i}\right) * \delta\left(t - \frac{A_i V_d}{\kappa_i}\right)\right) \tag{2.31}$$

여기서 속도 기울기 κ_i는 가속도 또는 감속도에 따라 결정되고 V_d는 구동기의 최대 속도가 될 수 있는 원하는 속도이다.

식 (2.30)과 (2.31)의 라플라스 변환을 표현하고 식 (2.29)의 phasor 형태를 활용함으로써 가속도 제한을 고려한 함수의 각 영역 명령 벡터를 나타내면 다음과 같다.

Collection @ chosun

조선대학교 CHOSUN UNIVERSITY

$$\overrightarrow{V_1}=\left|\frac{2\kappa_a\sin\left(\frac{A_1 V_d\omega_n}{2\kappa_a}\right)}{L\omega_n^2}\right|\angle\left[\omega_n t_1+\frac{A_1 V_d\omega_n}{2\kappa_a}\right] \tag{2.32}$$

$$\overrightarrow{V_2}=\left|\frac{2\kappa_a\sin\left(\frac{A_2 V_d\omega_n}{2\kappa_a}\right)}{L\omega_n^2}\right|\angle\left[\omega_n t_2+\frac{A_2 V_d\omega_n}{2\kappa_a}\right] \tag{2.33}$$

$$\overrightarrow{V_3}=\left|\frac{2\kappa_a\sin\left(\frac{A_3 V_d\omega_n}{2\kappa_a}\right)}{L\omega_n^2}\right|\angle\left[\omega_n t_3+\frac{A_3 V_d\omega_n}{2\kappa_a}\right] \tag{2.34}$$

EI_{AL} shaper를 설계함에 있어 ω에 대하여 미분하였을 때 implicit form으로 나타나 exact solution을 구할 수 없다. Fig. 2-5는 강건한 입력성형 제어기인 ZVD shaper와 EI shaper의 임펄스 크기가 잔류변위에 미치는 영향을 보여준다. system modeling error가 없을 때 EI shaper의 경우 잔류변위가 허용되지만 ZVD shaper의 경우 잔류변위가 0이 나타난다. EI_{AL} shaper의 경우 잔류변위를 허용하는 특징이 있으므로 A_1, A_2, A_3는 기존의 EI shaper의 크기로 가정하였다. 식 (2.32)에 대하여 각 명령 벡터를 정규화 하면, phasor vector는 다음과 같이 표현된다.

$$\overrightarrow{V_1}=\left|\sin\left(\frac{1}{2}\frac{A_1 V_d\omega_n}{\kappa_a}\right)\right|\angle[0] \tag{2.35}$$

$$\overrightarrow{V_2}=\left|\sin\left(\frac{1}{2}\frac{A_2 V_d\omega_n}{\kappa_a}\right)\right|\angle\left[\omega_n t_2+\frac{1}{2}\frac{V_d\omega_n}{\kappa_a}(A_2-A_1)\right] \tag{2.36}$$

$$\overrightarrow{V_3}=\left|\sin\left(\frac{1}{2}\frac{A_3 V_d\omega_n}{\kappa_a}\right)\right|\angle\left[\omega_n t_3+\frac{1}{2}\frac{V_d\omega_n}{\kappa_a}(A_3-A_1)\right] \tag{2.37}$$

EI_{AL} shaper의 경우 잔류변위를 허용하는 입력성형제어기로 hump 형태의 sensitivity를

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

나타내기 위해서 세 영역으로 나누어서 설계한다. 첫 번째는 $\omega_n \le \omega_{sys}$ 일 때, 두 번째는 $\omega_n = \omega_{sys}$ 일 때 그리고 세 번째는 $\omega_n \ge \omega_{sys}$ 일 때이다. 첫 번째와 세 번째 영역에서의 잔류변위는 0 %이고 두 번째 $\omega_n = \omega_{sys}$ 영역에서는 $V_{\lim}$ %만큼의 잔류 변위를 허용한다. sensitivity curve의 대칭성을 위해 $\theta_3 = 2\theta_2$를 가정하고 설계한다. 위의 정규화 된 phasor vector 식 $\overrightarrow{V_1}$, $\overrightarrow{V_2}$, $\overrightarrow{V_3}$의 크기와 위상각을 이용해 vector diagram으로 나타내면 Fig. 2-11로 나타난다. 이때 빨간 점선은 $\omega_n \le \omega_{sys}$, 파랑 점선은 $\omega_n \ge \omega_{sys}$ 그리고 검은색 실선은 $\omega_n = \omega_{sys}$를 나타낸다.

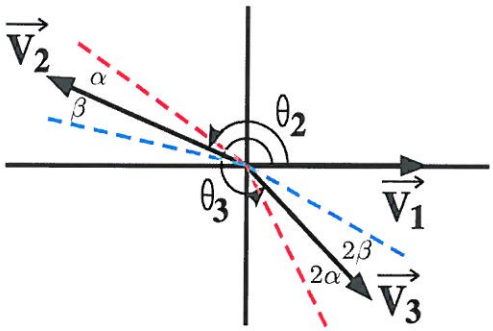


Fig. 2-11 Vector Diagram of EI_{AL} shaper

위의 정규화 된 phasor vector식은 vector diagram에서 사용될 수 있다. Fig. 2-11에서 검은색 실선 $\omega_n = \omega_{sys}$일 때는 벡터의 합이 unshaped 잔류변위의 $V_{\lim}$% 크기를 가져야 하고 $\omega_n \le \omega_{sys}$ 일 때의 빨간 점선과 $\omega_n \ge \omega_{sys}$일 때의 파란 점선에서는 벡터의 합이 0의 잔류변위를 가져야 한다. cosine law와 삼각함수 공식 $\cos(2\theta) = 2\cos^2(\theta) - 1$을 활용하여 빨간 점선과 파란 점선의 잔류변위를 0으로 만들면 식 (2.38)의 조건식과 같다.

$$\left|\overrightarrow{V_1}\right| = \left|\overrightarrow{V_3}\right| \tag{2.38}$$

마찬가지로 검은색 실선의 연장선을 이용하여 삼각형을 만든 후 $\left|\overrightarrow{V_1}\right|$ 벡터와 이동한 $\left|\overrightarrow{V_2}\right|$ 벡터의 사잇각을 a, $\left|\overrightarrow{V_1}\right|$ 벡터와 연장된 $\left|\overrightarrow{V_3}\right|$ 벡터의 사잇각을 b라고 할 때

Collection @ chosun

조선대학교 CHOSUN UNIVERSITY

cosine law를 활용하여 결정된 a, b는 다음과 같다.

$$a = \cos^{-1}\left(\frac{|\overrightarrow{V_1}|^2 + |\overrightarrow{V_2}|^2 - |\overrightarrow{V_3}|^2}{2|\overrightarrow{V_1}||\overrightarrow{V_2}|}\right) \tag{2.39}$$

$$b = \cos^{-1}\left(\frac{|\overrightarrow{V_1}|^2 + |\overrightarrow{V_3}|^2 - |\overrightarrow{V_2}|^2}{2|\overrightarrow{V_1}||\overrightarrow{V_3}|}\right) \tag{2.40}$$

Fig. 2-11과 식 (2.36), (2.37)을 활용한 위상각은 $\theta_2 = \omega_n t_2 + \frac{V_d \omega_n}{2\kappa_a}(A_2 - A_1) = \pi - \alpha$, $\theta_3 = \omega_n t_3 + \frac{V_d \omega_n}{2\kappa_a}(A_3 - A_1) = \pi + \beta$로 나타낼 수 있으며 이를 이용한 임펄스 시간 t_2와 t_3는 다음과 같이 결정된다.

$$t_2 = \frac{1}{\omega_n}\left\{\pi - \frac{V_d \omega_n}{2\kappa_a}(A_2 - A_1)\right\} \tag{2.41}$$

$$t_3 = \frac{1}{\omega_n}\left\{2\pi - \frac{V_d \omega_n}{2\kappa_a}(A_3 - A_1)\right\} \tag{2.42}$$

정지 동작에 대한 switch time은 시작 동작과 같은 절차를 갖으며, 임펄스 크기의 부호는 비대칭 적으로 변경된다. 또한 정지 동작에서는 시작 동작에서의 가속도 κ_a대신 감속도 κ_d를 사용하여 정지 동작에 대한 임펄스 시간 t_5와 t_6는 다음과 같이 표현된다.

$$t_5 = t_4 + \frac{1}{\omega_n}\left\{\pi - \frac{V_d \omega_n}{2\kappa_d}(A_5 - A_4)\right\} \tag{2.43}$$

$$t_6 = t_4 + \frac{1}{\omega_n}\left\{2\pi - \frac{V_d \omega_n}{2\kappa_d}(A_6 - A_4)\right\} \tag{2.44}$$

여기서 $t_4 = t_p$ 로 pulse duration을 의미하며 시작 동작의 지속시간을 의미한다. 이때 EI_{AL}는 제동 지연보다 지배적인 가속도의 제한으로 인한 경사 때문에 다음과 같은 제

Collection @ chosun

조선대학교 CHOSUN UNIVERSITY

약 조건에서 사용해야 한다.

$$t_p \geq t_3 + \frac{A_3 V_d}{\kappa_a} \tag{2.45}$$

식 (2.45)을 만족하면, EI_{AL} shaper는 비대칭 가속 및 제동이 있는 구동기를 가지는 유연시스템에서 잔류변위 감소에 성능이 나타난다. 식 (2.41)~(2.44)를 활용해 유연 시스템의 시작 및 정지 명령에 대한 EI_{AL} shaper는 다음과 같이 표시된다.

$$\begin{bmatrix} A_i \\ t_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{(1+V_{\lim})}{4} & \frac{(1-V_{\lim})}{2} & \frac{(1+V_{\lim})}{4} & \frac{-(1+V_{\lim})}{4} & \frac{-(1-V_{\lim})}{2} & \frac{-(1+V_{\lim})}{4} \\ 0 & t_2 & t_3 & t_p & t_5 & t_6 \end{bmatrix} \tag{2.46}$$

위의 식 (2.46)은 강건한 입력 명령에 대한 convolution에 의해 비대칭 가속 및 제동이 있는 구동기를 사용하여 ramp 형태의 명령을 생성하는 데 사용된다. EI_{AL} shaper의 분석 개발 절차를 확장하여 비이상적인 구동기로 다양한 명령을 생성할 수 있다.

2.3 성능 평가

ZVD_{AL} shaper과 EI_{AL} shaper의 잔류변위 저감 성능은 지속 시간(t_p), 줄 길이(L_m)에 따른 입력성형 커맨드의 완성도와 system modeling error에 대한 강건성에 대하여 평가한다. ZVD_{AL} shaper과 EI_{AL} shaper의 제어 효과는 Fig. 2-3의 pendulum system을 이용하여 기존의 ZVD shaper와 EI shaper를 비교 분석한다. numerical simulation은 MATLAB®을 이용하였으며 입력성형제어기를 설계함에 있어 필요한 변수 값은 Table. 2-1과 같이 설정하였다.

2.3.1 ZVD_{AL} 성능 평가

ZVD_{AL} shaper는 Table. 2-1의 매개변수를 사용하여 Fig. 2-12과 Fig. 2-13에서 ramp 형태로 인해 생성된 명령의 완전성을 평가한다. Fig. 2-12은 pulse duration(t_p)에 따른

Collection @ chosun

조선대학교 CHOSUN UNIVERSITY

ZVD shaper와 ZVD_{AL} shaper의 command의 완성도를 나타낸다. 입력성형 제어 방법은 지속시간(t_p)에 따라 3개의 영역으로 나눠진다. 여기서 A영역은 short command로 ramp 형태의 명령이 완성되기 전에 지속시간(t_p)가 작용하여 약간의 잔류변위가 발생한다. B 영역은 interference command로 short command와 long command 사이에서 지속시간(t_p)가 작용하여 잔류변위가 가장 크게 나타난다. C 영역은 long command로 ramp 형태의 명령이 완성되며 ZVD_{AL} shaper가 ZVD shaper 보다 우수한 성능을 보여준다.

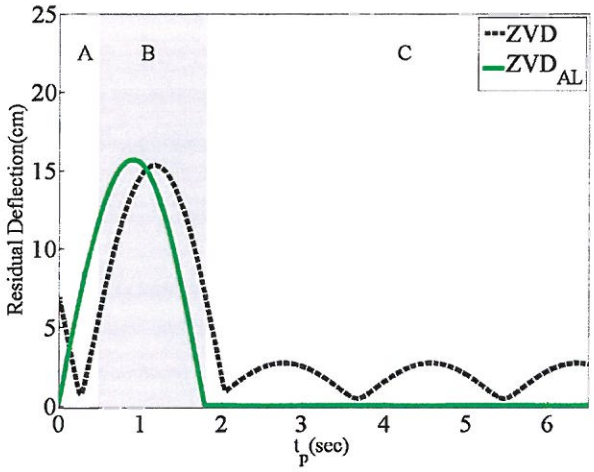


Fig. 2-12 ZVD_{AL} Command completeness effects to t_p

Fig. 2-13은 줄 길이 L_m에 따른 ZVD_{AL} shaper와 ZVD shaper의 long command에서 잔류변위를 나타내고 있다. 전반적으로 가속도 제한을 고려한 ZVD_{AL} shaper 경우 0의 잔류변위를 나타내며 long command의 경우 가속도가 제한된 ramp 형태의 명령이 완성되는 영역으로 이상적인 ZVD shaper의 경우 불규칙적으로 $0.1cm$ ~ $0.4cm$ 잔류변위가 나타난다.

Table. 2-1 System Parameters of ZVD_{AL} and EI_{AL} shapers

변수	L	κ_a	κ_d	V_d	t_p
값	$0.8m$	$1m/\sec^2$	$1.5m/\sec^2$	$0.2m/\sec$	3.5sec

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

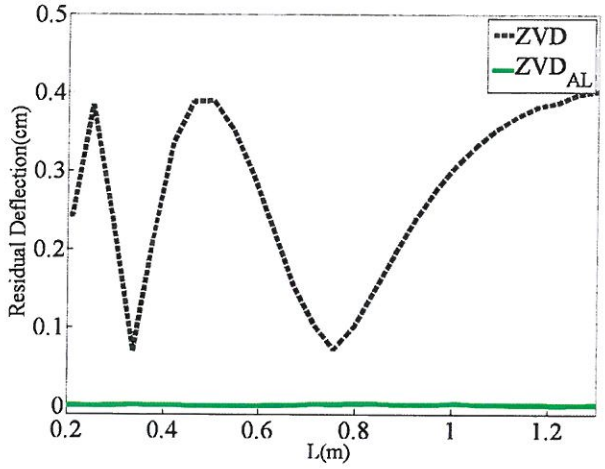


Fig. 2-13 ZVD_{AL} **Command completeness effects to** L_m

위의 Fig. 2-14는 κ_a와 κ_d에 대하여 ZVD_{AL}와 ZVD shaper의 잔류변위 저감 성능을 비교한 그림이다. κ_a와 κ_d의 범위를 0.3~5$m/\sec^2$ 영역에서 진행하였다. ZVD_{AL} shaper의 경우 전체 적인 영역에서의 잔류 변위가 0이지만 ZVD shaper의 경우 잔류변위가 그래프 상에서 0에서 0.73cm정도의 변위가 발생한다. κ_a와 κ_d가 같은 값을 가질 경우 ZVD shaper의 잔류변위가 없어지고 있다. 이는 κ_a와 κ_d가 같을 경우 ZVD와 ZVD_{AL} shapers의 임펄스의 시간이 동일한 값을 갖게 되어 잔류변위가 발생하지 않는다.

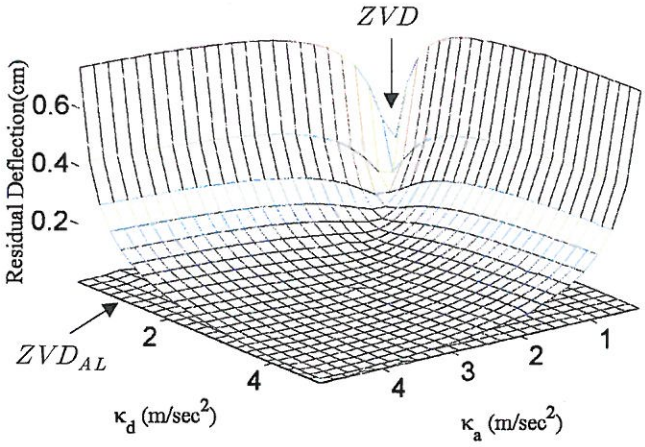


Fig. 2-14 Residual Vibration of ZVD_{AL} **shaper to** κ_a **and** κ_d

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

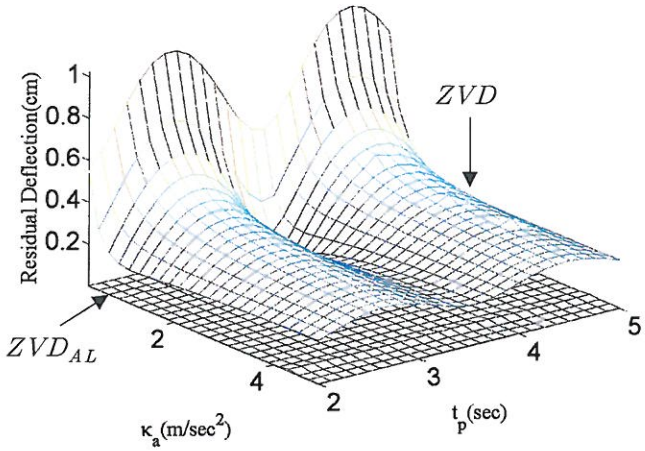


Fig. 2-15 Residual Vibration of ZVD_{AL} shaper to κ_a and t_p

Fig. 2-15은 κ_a와 t_p에 대하여 ZVD_{AL}와 ZVD shaper의 잔류변위 저감 성능을 비교한 그림이다. κ_a의 범위를 0.3~5$m/\sec^2$, t_p의 범위를 2~5(sec)로 설정하여 진행하였다. ZVD_{AL} shaper의 경우 전체 적인 영역에서의 잔류 변위가 0이지만 ZVD shaper의 경우 잔류변위가 그래프 상에서 약 0.2~1cm 정도의 변위가 발생한다. ZVD shaper는 t_p값에 따라 잔류변위의 크기가 주기적인 특성을 보인다. ZVD_{AL} shaper는 long command로 설계되어 잔류변위가 0으로 나타난다.

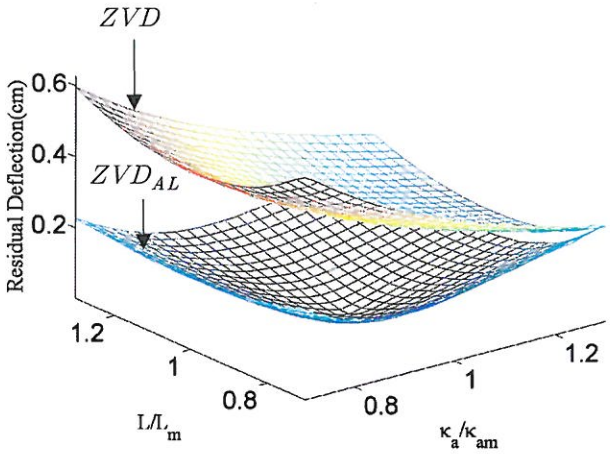


Fig. 2-16 Sensitivity of ZVD_{AL} shaper to L and κ_a

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

위의 Fig. 2-16은 κ_a와 줄 길이 L에 대하여 ZVD_{AL} shaper와 ZVD shaper의 강건성을 나타내고 있다. 변수 설정은 Table. 2-1과 동일하며 κ_{am}을 1, L을 0.8로 설정하고 진행 하였다. ZVD_{AL} shaper의 경우 전체적인 영역에서의 잔류 변위가 ZVD shaper보다 낮게 나타나고 있다. 또한 κ_a/κ_{am}와 L/L_m의 값이 1일 때 잔류변위의 크기가 0으로 낮게 나타나고 system modeling error에 대한 강건함이 나타난다.

2.3.2 EI_{AL} 성능 평가

EI_{AL} shaper는 Table. 2-1의 매개변수를 사용하여 Fig. 2-17과 Fig. 2-18의 ramp 형태로 인해 생성된 명령의 완전성을 평가한다. Fig. 2-17은 pulse duration(t_p)에 따른 EI shaper와 EI_{AL} shaper의 command의 완성도를 나타낸다. 여기서 A영역은 short command, B 영역은 interference command로 잔류변위가 가장 크게 나타난다. C 영역은 long command로 EI_{AL} shaper가 EI shaper 보다 우수한 성능을 보여준다. 허용한 잔류 오차 범위는 5%이며 검은색 점선으로 표현하였다.

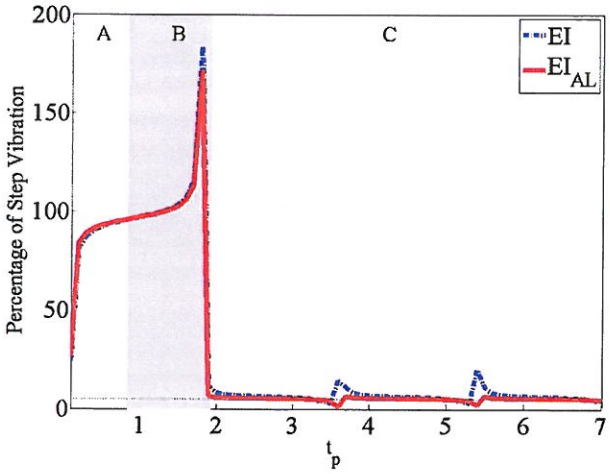


Fig. 2-17 EI_{AL} Command completeness effects to t_p

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

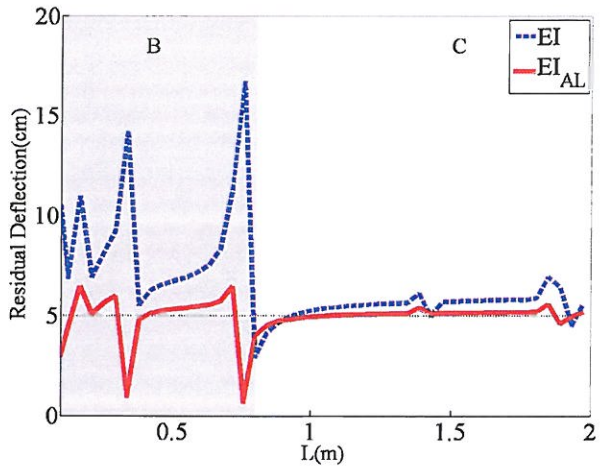


Fig. 2-18 EI_{AL} Command completeness effects to L_m

Fig. 2-18은 줄 길이(L_m)에 EI_{AL} shaper와 EI shaper의 interference command와 long command에서 잔류변위를 나타내고 있다. B 영역은 interference command로써 가속도가 제한된 ramp 형태의 명령이 완성되지 않아 EI shaper의 경우 큰 잔류변위가 나타난다. 또한 EI_{AL} shaper 경우 5%의 허용 잔류변위를 1% 정도 overshoot 되는 현상이 나타난다. C 영역은 long command로써 가속도가 제한된 ramp 형태의 명령이 완성되는 영역으로 이상적인 EI shaper의 경우 불규칙적으로 잔류변위가 나타난다. 반면 EI_{AL} shaper의 경우 전반적으로 허용 잔류변위의 크기와 동일한 잔류변위가 나타난다.

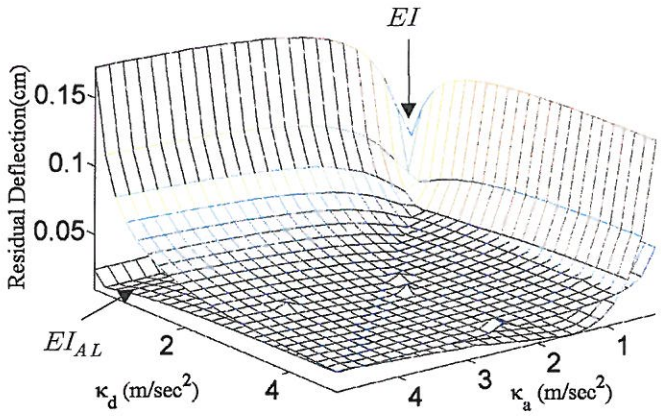


Fig. 2-19 Residual Vibration of EI_{AL} shaper to κ_a and κ_d

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Fig. 2-19은 가속도 κ_a와 감속도 κ_d에 따른 EI_{AL} shaper와 EI shaper의 차이를 보여주고 있다. 가속도와 감속도의 범위는 $0.3m/s^2$ ~ $5m/s^2$로 설정하였으며, EI_{AL} shaper의 경우 전체적으로 0.01cm 의 잔류변위를 허용하지만 EI shaper의 경우 0.17cm 잔류변위가 나타났다. 이때 가속도와 감속도의 크기가 같으면 구동기의 가속도 제한을 고려한 EI_{AL} shaper와 EI shaper의 잔류변위 저감 성능이 같아진다. 또한 가속도 κ_a와 감속도 κ_d의 값이 커질수록 linear 구동기와 유사한 구동을 하기 때문에 오차가 감소함에 따라 잔류변위 자체도 줄어든다. 따라서 가속도 제한을 고려한 설계시 가속도와 감속도의 크기를 고려해야 한다.

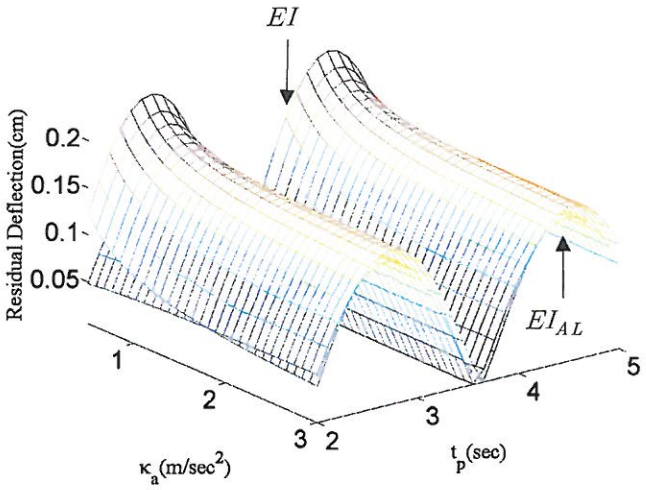


Fig. 2-20 Residual Vibration of EI_{AL} shaper to κ_a and t_p

Fig. 2-20은 가속도 κ_a와 지속 시간 t_p에 따른 EI_{AL} shaper와 EI shaper의 차이를 보여주고 있다. κ_a는 $0.5m/s^2$ ~ $3m/s^2$, t_p는 $2s$ ~ $5s$로 시뮬레이션을 진행하였다. 특성상 잔류오차를 허용하지만 EI shaper의 경우 EI_{AL} shaper에 비해 잔류 오차의 크기가 미세하게 높으며 가속도 κ_a가 낮은 구간에서는 잔류 변위의 크기가 0.25cm 가량 증가하고 가속도의 크기가 클수록 linear 구동기와 유사한 구동을 하기 때문에 오차가 더욱 줄어들고 있다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

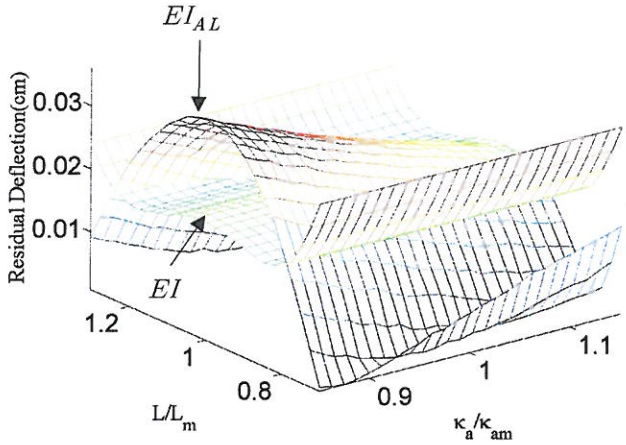


Fig. 2-21 Sensitivity of EI_{AL} shaper to L_m and κ_a

Fig. 2-21는 줄길이 L_m과 가속도 κ_a에 대한 강건성을 보여주는 그림으로써 줄길이는 $0.8m$, 가속도는 $1m/s^2$로 설정하였다. EI_{AL} shaper의 경우 hump 형태의 모양을 유지하며 가속도의 오차가 설정한 가속도를 넘어갔을 때 잔류변위의 크기가 증가하였다. EI shaper의 경우 hump 형태의 모양이 나타나지 않으며 잔류변위의 크기가 0.02의 크기를 유지하고 있다.

3절의 numerical simulation에 따라, ZVD_{AL} shaper와 EI_{AL} shaper는 ZVD shaper와 EI shaper 보다 더 강건하고 잔류변위 제어 성능이 증가함을 보인다. 가속도가 제한된 구동기의 정확한 제어 성능을 얻기 위해서는 shaper를 설계함에 있어 비선형 효과를 수용해야 한다. 4절에서는 가속도가 제한된 구동기로 인한 비선형 ZVD_{AL} shaper와 EI_{AL} shaper를 mini-Bridge Crane 실험을 통해 검증한다.

2.4 실험적 검증

3절에서 제시한 input shaper의 성능을 확인하기 위해 Fig. 2-22과 같은 mini-Bridge Crane을 활용하였다. Fig. 2-23는 실험 검증에 활용되는 mini-Bridge Crane을 구성하는 하드웨어 및 소프트웨어 구성 요소를 나타낸다. 하드웨어 구성 요소에서 Programmable Logic Controller(PLC)는 제안된 알고리즘을 수행하기 위해 무선 로컬 영역 네트워크에 의해 컴퓨터에 연결되고 PLC에 의해 생성된 속도 명령은 Bridge, Trolley 모터 드라이

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

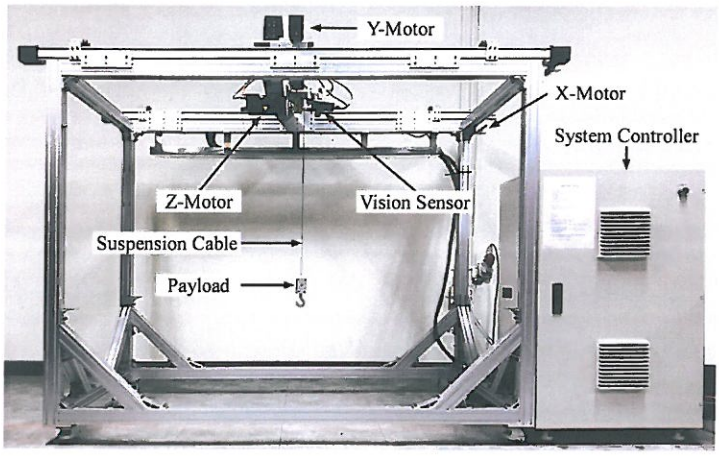


Fig. 2-22 mini-Bridge Crane

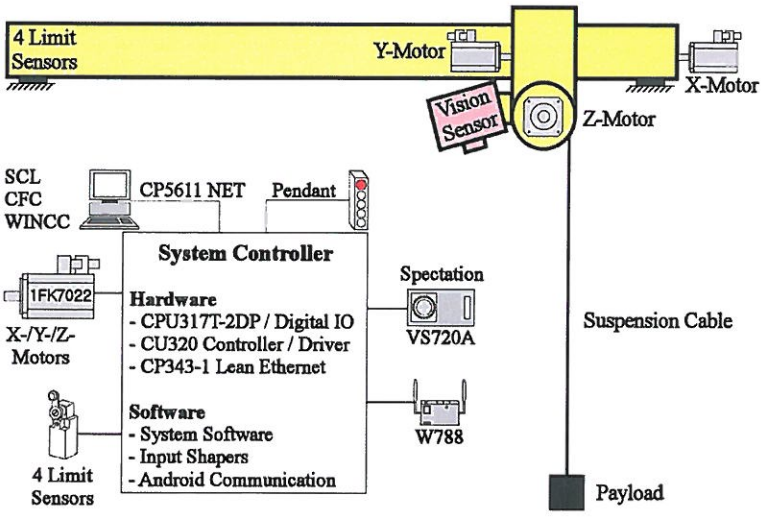


Fig. 2-23 Hardware Configuration

브로 전송된다. 드라이브는 PLC에서 들어오는 명령을 모터의 속도 설정 지점으로 사용한다. 모터 드라이브는 synchronous AC 모터를 사용하며 통신 모듈 및 모터 용 제어 드라이버로 구성된다. 소프트웨어 구성 요소인 CFC, SCL 그리고 WinCC 소프트웨어는 실험 데이터를 업로드 및 다운로드하는 시스템 운영 프로그램에 사용된다. VS 720 계열의 비전 센서는 Spectation 소프트웨어를 통해 작성된 비전 프로그램으로 payload 진동의 크기를 측정하는데 사용된다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

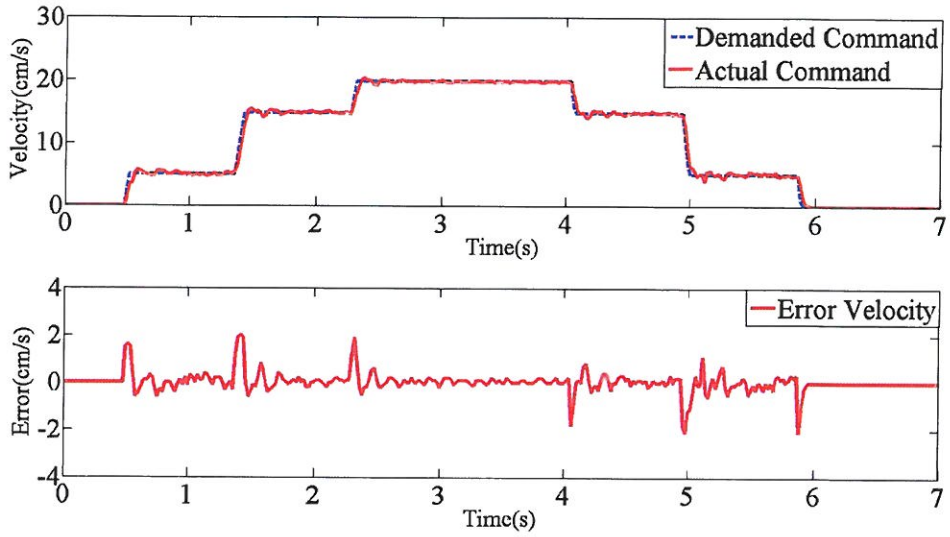


Fig. 2-24 Experimental command accuracy

구동기의 불균형 가속 및 제동을 고려한 명령을 가능한 정확하게 추적하기 위해 모터 제어 드라이버에서 pi gain과 가속 및 제동을 조정하였다. 이번 실험에서 p gain은 0.25 그리고 i gain은 10ms로 시스템을 설정하였다. Fig. 2-24은 입력한 명령과 실제 mini-Bridge Crane에서 실행하는 명령의 오차가 $\pm 2cm/s^2$ 범위 내로 나타남을 보여준다. 이번 실험 장치에서 ZVD_{AL} shaper와 EI_{AL} shaper의 설계 변수는 $\kappa_a = 1m/s^2$, $\kappa_d = 1.5m/s^2$, $t_p = 3.5s$, $L = 0.8m$, $V_d = 0.2m/s$ 그리고 $V_{\lim} = 5(\%)$로 3절의 성능 평가와 비슷하게 설정하였다.

ZVD_{AL} shaper와 EI_{AL} shaper는 mini-Bridge Crane을 사용한 shaper 매개 변수 및 잔류 처짐의 변화를 기반으로 실험적으로 검증하였다. 본 연구에서 제시하는 shaper의 제어 성능은 수치적 및 실험적 관점에서 ZVD shaper와 EI shaper의 제어 성능과 비교한다. 속도 명령의 정확도는 실험 장치에 의해 생성된 속도 명령의 오차가 잔류 변위에 영향을 미치는 Fig. 2-25 에서 이해할 수 있다. 실제 실험 장치에서 실행하는 명령에서 ZVD_{AL} shaper의 시간 응답은 Fig. 2-25에 도시 된 바와 같이 ZVD shaper와 달리 잔류 변위 감소에서 더 나은 성능이 나타난다. ZVD_{AL} shaper의 경우 ZVD shaper와 비교했을 시 잔류 변위의 크기가 전반적으로 0 에 가까이 나타나고 있으며 약간의 오차가 있는 부분은 Fig. 2-24의 velocity error에 따라 발생된다. ZVD shaper의 경우 주기적으로 1.2cm 정도의 진폭의 잔류변위가 나타난다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

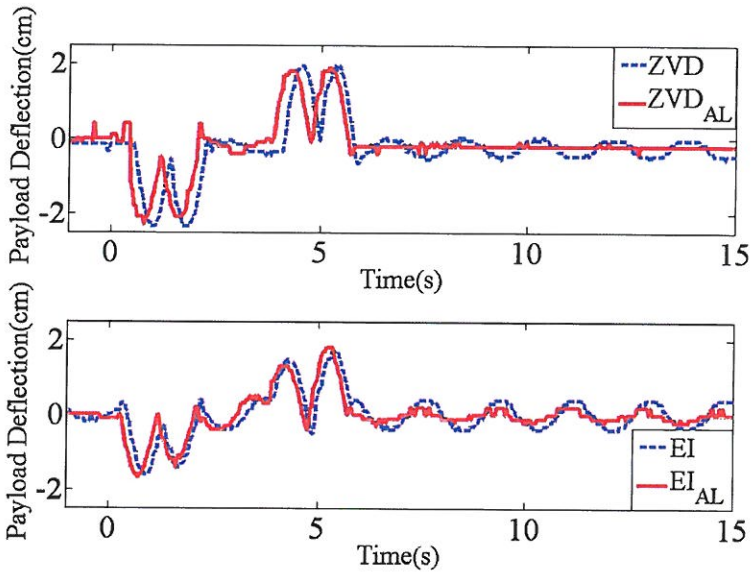


Fig. 2-25 Payload Deflection responses of ZVD, ZVD_{AL}, EI and EI_{AL}

Fig. 2-25의 EI_{AL} shaper의 경우 잔류 변위를 허용함에 있어 약간의 오차가 있지만 전반적으로 설계한 허용 잔류 변위의 크기에 가까우며 EI shaper의 경우 설계한 허용 잔류 변위의 크기를 넘어선 오차를 보이고 있다.

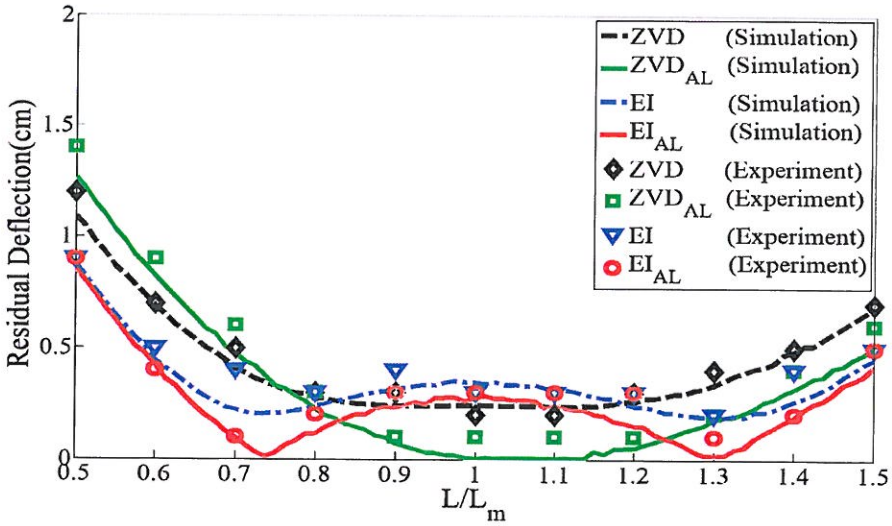


Fig. 2-26 Sensitivity of ZVD_{AL} and EI_{AL} shapers to L/L_m

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Fig. 2-26은 줄 길이 L에 대한 system modeling error에 대한 sensitivity curve이다. 실험 시 변수는 $\kappa_a = 1\,m/s^2$, $\kappa_d = 1.5\,m/s^2$, $t_p = 3.5\,s$, $L = 0.8m$, $V_d = 0.2\,m/s$로 설계하였다. 전반적으로 Fig. 2-25의 velocity error 와 실험 시 외부 환경으로 인해 simulation 한 결과와 약간의 오차가 발생한다. 실험 결과는 다수의 실험을 통한 평균적인 데이터이다. EI shaper의 경우 설계한 허용 잔류변위를 벗어나며 hump 형태의 크기가 작다. ZVD shaper의 대부분의 system modeling error에서 ZVD_{AL} shaper보다 잔류변위의 크기가 높다. 하지만 가속도가 제한을 고려한 ZVD_{AL} shaper와 EI_{AL} shaper의 경우 잔류 변위의 크기가 0 그리고 허용한 $V_{\lim}$ 크기 만큼 잔류변위가 나타난다. 전체적으로 ZVD_{AL} shaper와 EI_{AL} shaper가 기존의 ZVD, EI shaper보다 강건함을 보인다.

Fig. 2-27는 가속도 제한의 중요 변수 중 하나인 가속도 κ_a에 따른 system modeling error에 대한 강건성을 나타낸 것이다. 실험 시 변수는 $\kappa_a = 1\,m/s^2$, $\kappa_d = 1.5\,m/s^2$, $t_p = 3.5\,s$, $L = 0.8m$, $V_d = 0.2\,m/s$로 설계하였다. 실험 결과는 다수의 실험을 통한 평균적인 데이터이다. ZVD shaper와 EI shaper의 경우 가속도에 따른 잔류변위의 영향을 거의 받지 않으며 전반적으로 Fig. 2-25의 velocity error 와 실험 시 외부 환경으로 인해 simulation 한 결과와 약간의 오차가 발생하지만 비슷한 잔류 변위를 유지하고 있다. ZVD shaper는 전반적으로 0.2cm, EI shaper는 전반적으로 0.3cm ~ 0.4cm의 잔류변

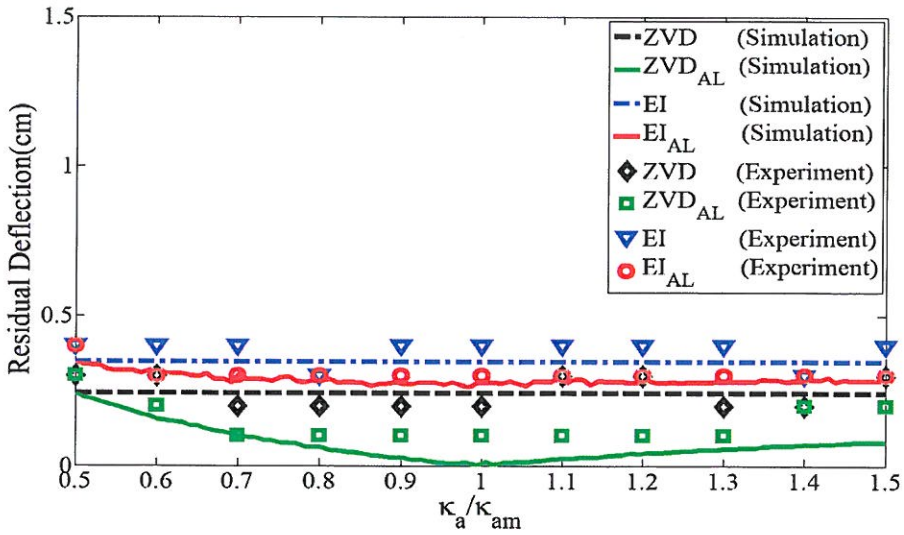


Fig. 2-27 Sensitivity of ZVD_{AL} and EI_{AL} shapers to κ_a/κ_{am}

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

위가 발생된다. 이에 비하여 ZVD_{AL} shaper의 경우 $\kappa_a = \kappa_{am}$ 일 때 잔류변위가 0이어야 하지만 약간의 오차가 발생하며 이를 기준으로 점점 system modeling error의 변화에 따라 잔류 변위가 발생한다. 실험 결과는 전반적으로 0.1cm의 크기가 나타난다. EI_{AL} shaper의 경우 $V_{\lim}$ (%) 만큼의 잔류변위를 허용함으로 0.3cm의 크기가 발생된다. 모든 실험 결과는 약간의 오차는 있지만 simulation의 크기를 크게 벗어나지는 않는다. ZVD_{AL} shaper와 EI_{AL} shaper는 가속도의 오차에 따라 잔류변위의 크기가 발생하지만 ZVD shaper와 EI shaper는 가속도의 오차에 관계없이 일정한 잔류변위가 발생된다.

2.5 결론

본 논문에서는 산업현장에서 일반적으로 사용되는 구동기 드라이브의 가속도 제한에 의한 잔류변위저감 성능을 고려함과 동시에 system modeling error에 대한 강건성을 포함한 ZVD_{AL} shaper와 EI_{AL} shaper를 제시한다. ZVD_{AL} shaper와 EI_{AL} shaper는 구동기의 가속도 제한 시 발생되는 ramp 형태의 응답을 phasor form 형태로 나타내고 vector diagram approach를 활용하여 Exact Solution을 개발하였다. 제어기의 성능을 평가하기 위해 설계 변수에 대한 잔류변위의 크기와 system modeling error에 대한 sensitivity를 기존의 이상적인 shaper와 비교 및 검증하였다. 실제 실험 장비인 mini-Bridge Crane을 이용하여 잔류변위 저감 성능과 설계 변수에 대한 강건한 결과가 나타났다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

3장. 비선형 구동기 1st-order를 고려한 강건 입력성형제어기

본 논문은 유연계의 비선형 구동기의 1st-order dynamics를 고려한 강건한 입력성형 제어방법을 제시한다. 실제 산업현장에서 linear 기반의 square 형태의 속도 프로파일을 이용한 입력성형제어방법은 시스템의 잔류변위를 발생시키고 입력성형제어기의 성능을 저하시킨다. 따라서 ZVD 입력성형제어기를 기반으로 구동기의 1st-order dynamincs를 고려한 속도 프로파일을 비선형 구동기의 동적 특성에 대한 응답으로 근사화하여 phasor form 형태의 벡터로 나타내고 이를 vector diagram approach를 이용하여 exact solution을 제시한다. 제시한 입력성형제어기를 이용하여 잔류변위와 강건성을 numerical simulation을 통해 평가 및 검증한다. 유연시스템의 비선형 구동기의 1st-order를 고려한 강건한 입력성형제어방법은 mini-Bridge Crane을 이용한 실험을 통해 sensitivity 및 잔류변위저감 성능을 검증한다.

3.1 서론

현재 reaction zet, piezo 구동기, 크레인 등 유연시스템은 산업현장에서 생산성, 안전성 등 다양한 영향을 미치고 있다. 그러므로 산업현장에서 작업 효율을 높이기 위한 이동과 위치에 관한 제어는 상당히 중요하다. 입력성형제어 방법은 물체의 이동과 이동이 끝난 후의 변위를 저감하여 유연시스템에서 발생되는 잔류변위를 없애는 효과적인 방법이다. 하지만 실제 산업현장에서는 모터 구동기의 비선형 동적 특성으로 인하여 기존의 이론적인 square 형태의 속도 프로파일을 이용한 입력성형제어방법은 잔류변위가 발생하고 입력성형제어기의 성능을 저하된다. 그러므로 실제 산업현장의 비선형 구동기의 동적특성을 고려함과 동시에 system modeling error에 대한 강건한 입력성형제어방법이 필요하다.

산업 현장에서 시스템의 오차에 대한 강건한 입력성형제어기에 관한 연구들이 계속 진행되어 왔다. Singer는 시스템의 고유주파수 오차에 대한 강건성을 위하여 Zero Vibration(ZV) 입력성형제어기의 고유주파수를 미분한 식을 이용하여 3개의 임펄스 형태의 Zero Vibration Derivate(ZVD)[1] 입력성형제어기를 개발하였다. 또한 Singhose,

Collection @ chosun

조선대학교 CHOSUN UNIVERSITY

Seering과 Singer는 잔류변위 식을 잔류변위 벡터로 나타내어 vector diagram approach[4~5]를 활용한 Hump 형태의 일정 변위를 허용하는 강건한 Extra Insensitivity(EI)[2] 입력성형제어기를 제시하였다. EI shaper의 경우 원하는 잔류변위를 허용하는 대신 강건성을 향상시킨 것으로 기존의 ZVD shaper보다 system modeling error에 대해 더 강건함을 보인다. 위의 두 입력성형제어기는 system modeling error에 대해서는 강건함을 보이지만 유연시스템의 구동기에 나타나는 비선형 dynamics가 고려되지 않아 실제 산업현장에서 활용 시 잔류변위의 성능이 저하가 나타난다.

실제 산업현장 유연시스템의 비선형 구동기의 동적 특성을 고려한 연구들은 현재까지 계속 진행 중에 있다. Blackburn[14]과 Singhose는 tower crane의 비선형 동적 특성을 고려한 입력성형제어기의 algorithm을 제시하였다. Slotine[15]과 Jean-Jacques는 비선형 구동기에 적용 가능한 제어를 제시하였다. Sorensen[16], Khalid와 William은 비선형 동적 특성으로 발생되는 잔류변위 저감 효과를 정량화하고 완화시킴으로 비선형 동적 특성에 대해 대응하는 방법을 제시하였다. Fortgang[17], Joel과 William은 비선형 진동 흡수 장치를 사용하여 잔류변위를 저감하며 입력 성형에 사용된 커맨드로부터 유발된 진동을 처리하기 위해 흡수 장치와 결합하는 방법을 사용하였다. Lawrence[18]와 William는 비선형 구동기의 영향으로 발생되는 동적 특성을 고려한 on-off 타입의 음의 임펄스를 허용한 비선형 입력성형 제어기를 제시하였다. 이 경우 비선형 동적 특성은 고려되었으나 system modeling error에 대한 강건성이 낮다는 단점이 있다.

따라서 실제 산업현장의 구동기의 비선형 동적 특성을 고려한 강건한 입력성형제어기를 제시한다. 2절에서는 비선형 구동기의 동적 특성을 고려한 pendulum system의 정상상태 응답식을 통해 phasor form로 나타내고 vector diagram approach를 적용하여 Zero Vibration Derivate First-Order(ZVD_F) shaper를 제시한다. 3절에서는 앞에서 제시한 입력성형 방법의 잔류 진동 크기와 shaper의 설계 변수에 대한 강건성에 대해 평가한다. 4절에서는 제시한 입력성형제어기를 mini-Bridge Crane을 통해 sensitivity, residual vibration 실험 결과를 통해 검증한다.

3.2 Robust 1st-order Input Shaper Development

ZVD_F shaper는 강건한 입력 성형 커맨드를 생성하기 위해 ZVD shaper를 기반으로 개발하였다. ZVD[1] shaper는 다음과 같이 간략하게 요약된다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

$$\begin{bmatrix} A_i \\ t_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{K^2+2K+1} & \frac{2K}{K^2+2K+1} & \frac{K^2}{K^2+2K+1} \\ 0 & \frac{T}{2} & T \end{bmatrix} \tag{3.1}$$

여기서 T는 유연시스템의 주기이고, $K=e^{-\zeta\pi/\sqrt{1-\zeta^2}}$이다. ZVD shaper는 계단 입력과 임펄스 시퀀스의 convolution을 통해 세 개의 계단 입력 명령 프로파일로 나타나며 이상적인 유연시스템의 잔류 진동을 0으로 만든다. 이때 $\zeta=0$인 경우에 대한 ZVD_F shaper를 설계하였다. ZVD shaper의 입력 프로파일이 이상적인 구동기에 적용되는 경우 입력 명령과 유사한 속도 프로파일을 얻을 수 있는 반면구동기의 비선형 동적 특성으로 움직이는 유연시스템에 적용되는 경우 Fig. 3-1과 같이 왜곡된 명령으로 인해 제어 성능이 저하된다. 따라서 구동기의 비선형 동적 특성을 고려한 강건한 입력 성형된 명령이 추가로 필요하다.

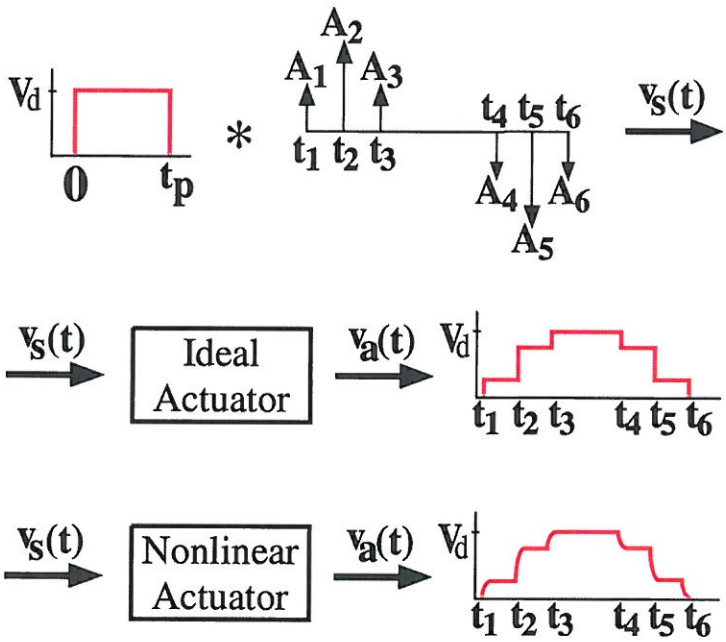


Fig. 3-1 Actuator effects to an ZVD shaper

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

$$t_p = t_3 + 3\tau_c \tag{3.2}$$

구동기의 비선형 동적 특성을 고려한 shaper는 식 (3.2)의 조건을 만족함과 동시에 사용할 수 있다. 여기서 t_3는 세 번째 임펄스 시간, τ_c는 세 번째 임펄스의 시상수, t_p는 pulse duration으로 지속시간을 의미한다. 이상적인 ZVD shaper 및 시스템의 주기를 고려하여 위의 조건을 만족하면 1st-order를 고려한 pendulum system의 phasor vector을 활용하여 분석적인 접근 방식을 제시할 수 있다.

vector diagram 접근법을 사용하면 시스템 입력에 대한 잔류 응답 함수인 phasor vector의 합이 유연시스템의 잔류 진동을 줄이기 위해 0이 되어야 한다. 따라서 Fig. 3-2의 pendulum system은 입력 성형 기술 개발의 일반성을 유지하면서 대표적인 유연

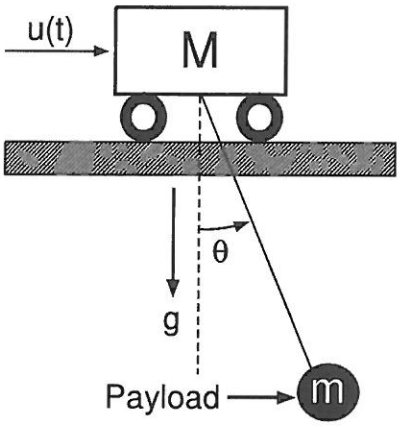


Fig. 3-2 Pendulum System

시스템으로 활용된다. pendulum system에 대한 하중을 모델링한 방정식은 식 (3.3)과 같이 표현되며 풀이과정은 Appendix A.1과 같다.

$$L\ddot{\theta}(t) + gsin\theta(t) = u(t)\cos\theta(t) \tag{3.3}$$

여기서 $u(t) = \dot{v}_a(t)$ 로 속도 입력 명령이고, L은 시스템 줄 길이 그리고 g는 중력 가속도를 말한다. 이때 $\theta(t)$를 미소 각도로 가정하면, 식 (3.3)은 laplace transform 하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

Collection @ chosun

조선대학교 CHOSUN UNIVERSITY

$$\theta(s) = G_p(s)\,V_a(s) = -\frac{s\,V_a(s)}{L}\frac{1}{s^2+\omega_n^2} \tag{3.4}$$

여기서 ω_n은 pendulum system의 고유 진동수이고 $V_a(s)$는 $v_a(t)$를 laplace transform한 것이다. 시스템의 출력 $\theta(s)$는 phasor 형태로 나타내기 위해 시스템 입력 $H(s)$와 sine input 형태로 나타내면 다음과 같다.

$$\theta(s) = \underbrace{-\frac{s\cdot V_a(s)}{L\omega_n}}_{H(s)}\cdot\underbrace{\frac{\omega_n}{s^2+\omega_n^2}}_{Sine\ Input} \tag{3.5}$$

잔류 진동에서 입력 성형 방법의 핵심은 식 (2.5)로부터 정상 상태 응답식을 다음과 같이 표현하는 것이다.

$$\theta_{ss}(t) = \frac{|V_a(j\omega_n)|}{L}sin\left(\omega_n t - \frac{\pi}{2} + \angle V_a(j\omega_n)\right) \tag{3.6}$$

식 (3.6)에서 잔류 진동이 없으면, $\theta_{ss}(t)$의 크기는 0이어야 한다. 따라서 $|V_a(j\omega_n)|$은 Fig. 3-3 (b)와 같이 input shaper의 임펄스 시간에 대한 분할된 명령에 의해 결정될 수 있다. 전체 속도 프로파일은 다음과 같이 표현된다.

$$v_a(t) = \sum_{i=1}^{3} h_i(t) * \delta(t-t_i) \tag{3.7}$$

여기서 $h_i(t)$는 Fig. 3-3의 각 영역의 함수이며 구동기 비선형 동적 특성을 고려하면 다음과 같은 함수로 근사화된다.

$$h_i(t) = A_i V_d\left(1-e^{-\frac{t}{\tau_i}}\right) \tag{3.8}$$

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

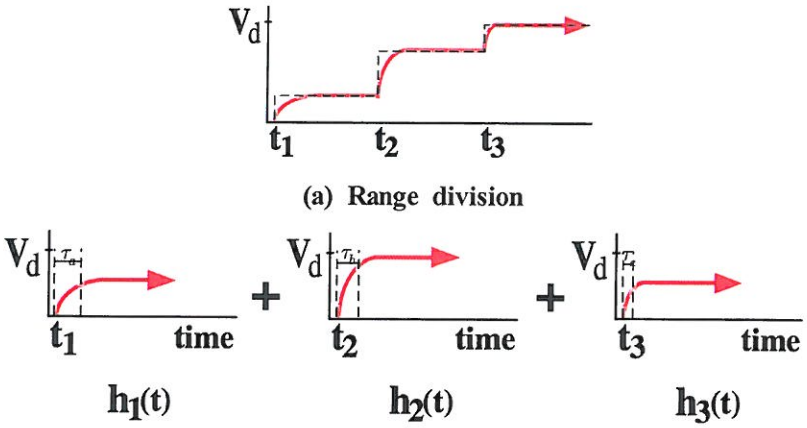


Fig. 3-3 Segmentation of a start command

여기서 A_i는 임펄스 크기, V_d는 요구 속도, τ_i는 임펄스의 시상수이다. 이때 시상수를 설계함에 있어 1st-order 형태의 입력 명령은 ZVD shaper를 기반으로 설계하므로 임펄스 크기에 따른 시상수(τ_i)를 고려하거나 모터의 성능에 따른 시상수(τ_i)가 고려되어야 한다. 식 (3.7)과 (3.8)의 라플라스 변환을 표현하고 각 영역의 명령 벡터는 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\overrightarrow{V_1} = \left| \frac{A_1 V_d}{L\omega\sqrt{(\tau_a\omega)^2+1}} \right| \angle \left[\omega t_1 - \frac{3}{2}\pi + \tan^{-1}\left(\frac{1}{\tau_a\omega}\right) \right] \tag{3.9}$$

$$\overrightarrow{V_2} = \left| \frac{A_2 V_d}{L\omega\sqrt{(\tau_b\omega)^2+1}} \right| \angle \left[\omega t_2 - \frac{3}{2}\pi + \tan^{-1}\left(\frac{1}{\tau_b\omega}\right) \right] \tag{3.10}$$

$$\overrightarrow{V_3} = \left| \frac{A_3 V_d}{L\omega\sqrt{(\tau_c\omega)^2+1}} \right| \angle \left[\omega t_3 - \frac{3}{2}\pi + \tan^{-1}\left(\frac{1}{\tau_c\omega}\right) \right] \tag{3.11}$$

ZVD_F shaper를 설계함에 있어 ω에 대하여 미분하였을 때 implicit form으로 나타나 exact solution을 구할 수 없다. Fig. 3-4는 강건한 입력성형 제어기인 ZVD shaper와 EI shaper의 임펄스 크기가 잔류변위에 미치는 영향을 보여준다. system modeling error가 없을 때 EI shaper의 경우 잔류변위가 허용되지만 ZVD shaper의 경우 잔류변위가 0이

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

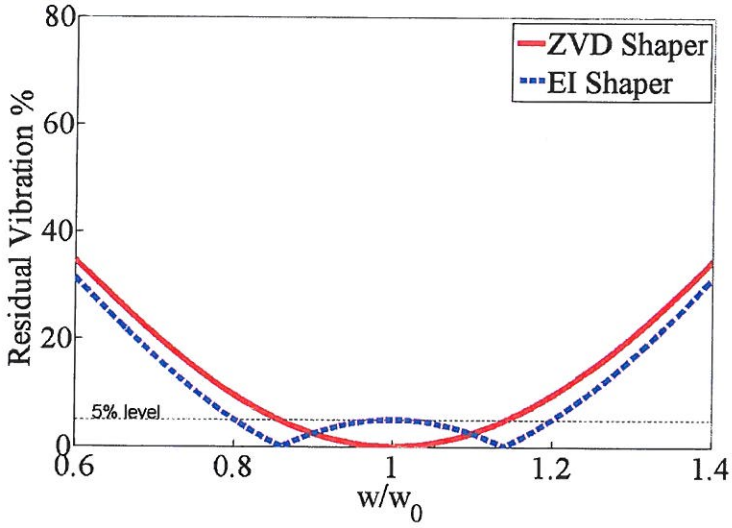


Fig. 3-4 Senstivity of ZVD and EI shaper

나타난다. ZVD_F shaper의 경우 잔류변위가 0이 되어야 하므로 A_1, A_2, A_3는 기존의 ZVD shaper의 크기로 가정하였다. 식 (3.9)에 대하여 각 명령 벡터를 정규화 하면, phasor vector는 다음과 같이 표현된다.

$$\overrightarrow{V_1} = |1| \angle [0] \tag{3.15}$$

$$\overrightarrow{V_2} = |\mu| \angle \left[\omega_n t_2 - \tan^{-1}\left(\frac{1}{\tau_b \omega_n}\right) + \tan^{-1}\left(\frac{1}{\tau_a \omega_n}\right) \right] \tag{3.16}$$

$$\overrightarrow{V_3} = |\lambda| \angle \left[\omega_n t_3 - \tan^{-1}\left(\frac{1}{\tau_c \omega_n}\right) + \tan^{-1}\left(\frac{1}{\tau_a \omega_n}\right) \right] \tag{3.17}$$

여기서

$$\mu = \frac{2\sqrt{(\tau_a \omega_n)^2 + 1}}{\sqrt{(\tau_b \omega_n)^2 + 1}} \tag{3.18}$$

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

$$\lambda = \frac{\sqrt{(\tau_a \omega_n)^2 + 1}}{\sqrt{(\tau_c \omega_n)^2 + 1}} \tag{3.19}$$

위의 정규화 된 phasor vector식은 vector diagram에서 사용될 수 있다. 구동기의 1st-order를 고려한 ZVD_F shaper의 잔류변위의 크기는 Fig. 3-5에서 세 벡터의 합에 의해 결정된다. Fig. 3-5에서 $|\overrightarrow{V_1}|$ 벡터와 점선 $|\overrightarrow{V_2}|$ 벡터의 사잇각을 α, $|\overrightarrow{V_1}|$ 벡터와 점선 $|\overrightarrow{V_3}|$ 벡터의 사잇각을 β라고 할 때 cosine law를 활용하여 결정된 α, β는 다음과 같다.

$$\alpha = \cos^{-1}\left(\frac{|\overrightarrow{V_1}^2| + |\overrightarrow{V_3}^2| - |\overrightarrow{V_2}^2|}{2|\overrightarrow{V_1}||\overrightarrow{V_3}|}\right)$$

$$\beta = \cos^{-1}\left(\frac{|\overrightarrow{V_1}^2| + |\overrightarrow{V_2}^2| - |\overrightarrow{V_3}^2|}{2|\overrightarrow{V_1}||\overrightarrow{V_2}|}\right)$$

Fig. 3-5과 식 (3.16), (3.17)을 활용한 벡터의 위상각은 $\theta_2 = \omega_n t_2 - \tan^{-1}\left(\frac{1}{\tau_b \omega_n}\right) + \tan^{-1}\left(\frac{1}{\tau_a \omega_n}\right) = \pi - \alpha$, $\theta_3 = \omega_n t_3 - \tan^{-1}\left(\frac{1}{\tau_c \omega_n}\right) + \tan^{-1}\left(\frac{1}{\tau_a \omega_n}\right) = \pi + \beta$로 나타낼 수 있으며 이를 이용한 임펄스 시간 t_2와 t_3는 다음과 같이 결정된다.

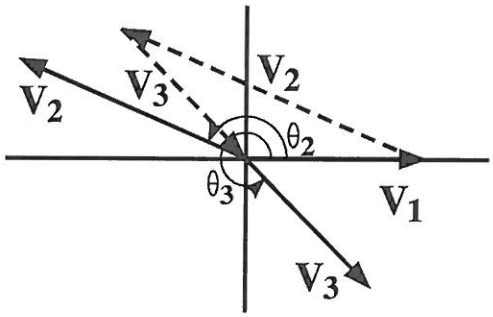


Fig. 3-5 Vector Diagram of an ZVD_F shaper

Collection @ chosun

조선대학교 CHOSUN UNIVERSITY

$$t_2 = \frac{1}{\omega}\left[\pi - \alpha + \tan^{-1}\left(\frac{1}{\tau_b \omega}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{1}{\tau_a \omega}\right)\right] \tag{3.20}$$

$$t_3 = \frac{1}{\omega}\left[\pi + \beta + \tan^{-1}\left(\frac{1}{\tau_c \omega}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{1}{\tau_a \omega}\right)\right] \tag{3.21}$$

정지 동작에 대한 switch time은 시작 동작과 같은 절차를 갖으며, 임펄스 크기의 부호는 비대칭 적으로 변경된다. t_4은 t_p에 의해 결정되며 임펄스의 시간 t_5와 t_6은 다음과 같다.

$$t_5 = t_p + \frac{1}{\omega}\left[\pi - \alpha' + \tan^{-1}\left(\frac{1}{\tau_b \omega}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{1}{\tau_a \omega}\right)\right] \tag{3.22}$$

$$t_6 = t_p + \frac{1}{\omega}\left[\pi + \beta' + \tan^{-1}\left(\frac{1}{\tau_c \omega}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{1}{\tau_a \omega}\right)\right] \tag{3.23}$$

여기서

$$\alpha' = \cos^{-1}\left(\frac{\left|\overrightarrow{V_4}^2\right| + \left|\overrightarrow{V_6}^2\right| - \left|\overrightarrow{V_5}^2\right|}{2\left|\overrightarrow{V_4}\right|\left|\overrightarrow{V_6}\right|}\right)$$

$$\beta' = \cos^{-1}\left(\frac{\left|\overrightarrow{V_4}^2\right| + \left|\overrightarrow{V_5}^2\right| - \left|\overrightarrow{V_6}^2\right|}{2\left|\overrightarrow{V_4}\right|\left|\overrightarrow{V_5}\right|}\right)$$

ZVD_F shaper 같은 경우 식 (3.16)과 (3.17)에서 확인할 수 있듯이 가속 시상수 τ_a와 τ_b가 같으면 t_2의 시간이 ZVD shaper와 동일하게 나타난다. 또한 τ_a와 τ_c가 같은 경우에도 기존의 ZVD shaper의 t_3 시간과 동일하게 나타난다. 그러므로 ZVD_F shaper를 설계할 때는 식 (3.24)의 조건식을 만족해야 한다.

Collection @ chosun

조선대학교 CHOSUN UNIVERSITY

$$\tau_a \neq \tau_b \neq \tau_c \tag{3.24}$$

식 (3.20) ~ (3.23)를 활용하여 유연 시스템의 시작 및 정지 명령에 대한 ZVD_F shaper는 다음과 같이 표시된다.

$$\begin{bmatrix} A_i \\ t_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.25 & 0.5 & 0.25 & -0.25 & -0.5 & -0.25 \\ 0 & t_2 & t_3 & t_p & t_5 & t_6 \end{bmatrix} \tag{3.25}$$

위의 식 (3.25)은 강건한 입력 명령에 대한 convolution에 의해 비선형 동적 특성의 구동기를 사용하여 명령을 생성하는 데 사용된다. ZVD_F shaper의 분석 개발 절차를 확장하여 비이상적인 구동기로 다양한 명령을 생성할 수 있다.

3.3 성능 평가

ZVD_F shaper의 잔류변위 저감 성능은 가속도 제한, 지속 시간(t_p), modeling error 에 대한 강건성에 대하여 평가한다. ZVD_F shaper의 제어 효과는 Fig. 3-2의 pendulum system을 활용하여 기존의 이상적은 linear 기반의 입력 명령인 ZVD shaper의 제어 효과와 비교한다. MATLAB®을 이용한 numerical simulation에서 기본적인 변수 값은 Table. 3-1과 같이 설정하였다. 이때 시상수는 모터의 성능에 따라 첫 번째 시상수의 시간이 가장 크며 점차 줄어들게 설정하였다.

Fig. 3-6은 지속 시간 (t_p)에 따른 ZVD shaper와 ZVD_F shaper의 잔류변위 변화를 나타낸다. 위의 그림은 long command에서 ZVD shaper와 ZVD_F shaper의 잔류변위의 크기를 나타낸다. ZVD shaper의 경우 0.22cm의 가장 높은 잔류변위가 주기적으로 나타난다. 반면에 ZVD_F shaper는 long command에서는 전체적으로 0의 잔류변위가 나타난다.

Table 3-1. System Parameters of ZVD_F shaper

변수	L	τ_a	τ_b	τ_c	V_d	t_p
값	$0.8m$	0.517sec	0.317sec	0.117sec	$0.2m/\text{sec}$	3.5sec

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

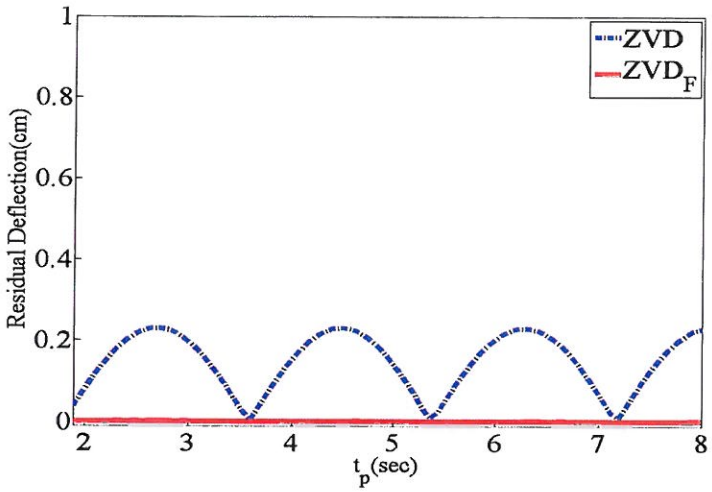


Fig. 3-6 Residual Deflection ZVD_F and ZVD shaper to t_p

Fig. 3-7은 줄 길이(L_m)에 따른 ZVD shaper와 ZVD_F shaper의 잔류변위 변화를 나타낸다. ZVD shaper의 경우 최대 0.9cm의 가장 높은 잔류변위가 나타나며 줄 길이가 짧을 때는 불규칙 적으로 잔류 변위가 나타난다. 반면에 ZVD_F shaper는 줄 길이의 변화에 관계없이 전체적으로 0의 잔류변위가 나타난다.

Fig. 3-8은 첫 번째 시상수 τ_a와 두 번째 시상수 τ_b에 따른 ZVD_F shaper와 ZVD shaper의 잔류변위의 크기를 평가한 것이다. ZVD_F shaper의 경우 시상수의 변화량에

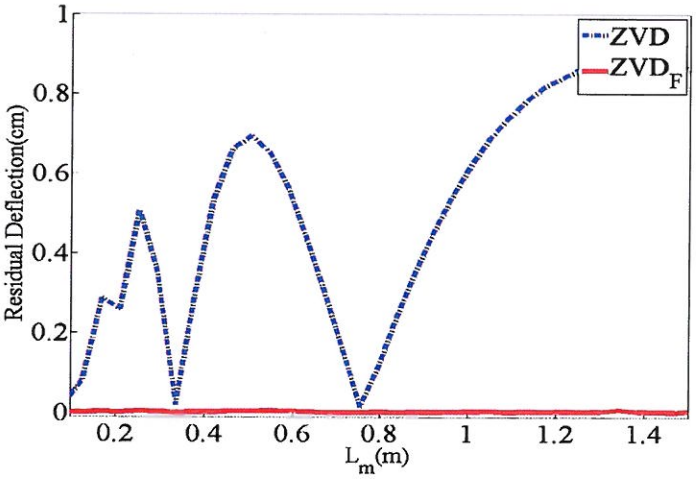


Fig. 3-7 Residual Deflection ZVD_F and ZVD shaper to L_m

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

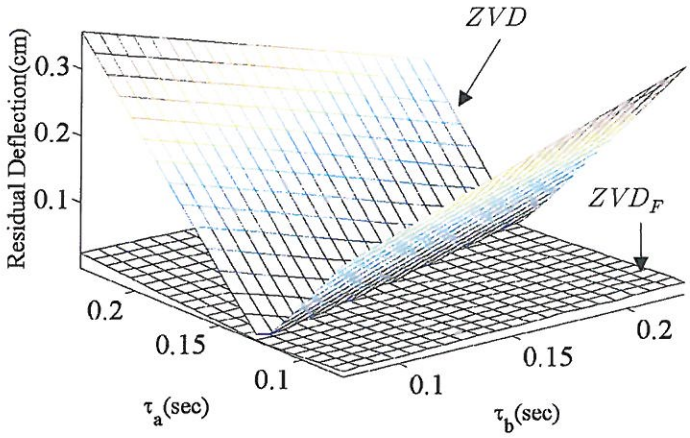


Fig. 3-8 Sensitivity of ZVD_F shaper to τ_a and τ_b

따라 약간의 오차가 발생하지만 전반적으로 0에 가까운 잔류변위가 나타났지만 ZVD shaper의 경우 많은 오차가 불규칙적으로 나타났다. 2절에서 시상수의 크기에 따른 제약조건이 있을 때 첫 번째 시상수와 두 번째 시상수, 세 번째 시상수의 크기가 같으면 ZVD_F shaper의 성능이 ZVD shaper의 성능과 같아짐을 위의 그림에서도 확인할 수 있다.

Fig. 3-9는 줄 길이 L_m과 첫 번째 시상수 τ_a에 따른 ZVD_F shaper와 ZVD shaper의 강건성을 평가한 것이다. ZVD_F shaper의 경우 앞선 시상수 변화량과 마찬가지로 약간의 오차가 발생하지만 전반적으로 움직임이 없다. 줄 길이의 오차가 없을 때 잔류변위

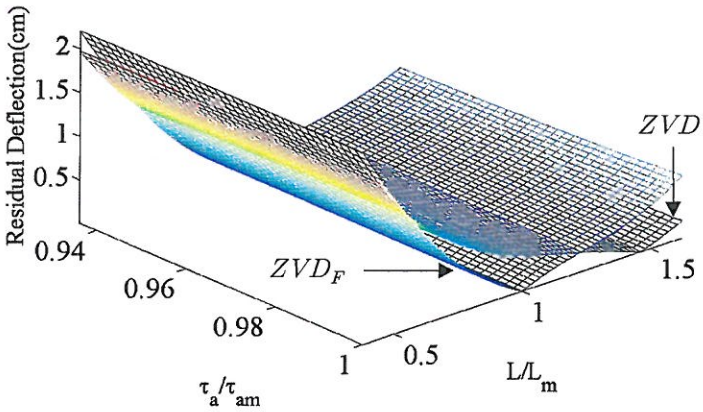


Fig. 3-9 Sensitivity of ZVD_F shaper to τ_a and L_m

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

는 0을 나타내지만 L_m에 변화량에 따라 잔류 변위가 점차 커지는 것을 알 수 있었다. ZVD shaper의 경우 줄 길이의 오차가 없을 때도 잔류변위의 크기가 0이 되지 않으며 줄 길이의 변화량에 따른 잔류 변위가 점차 커짐을 알 수 있다.

3절의 numerical simulation에 따라, ZVD_F shaper는 ZVD shaper보다 더 강건하고 잔류변위 제어 성능이 증가함을 보인다. 비선형 동적 특성을 갖는 구동기의 정확한 제어 성능을 얻기 위해서는 shaper를 설계함에 있어 비선형 효과를 수용해야 한다. 4절에서는 비선형 동적 특성을 갖는 구동기에 ZVD_F shaper를 mini-Bridge Crane 실험을 통해 검증한다.

3.4 실험적 검증

3절에서 제시한 input shaper의 성능을 확인하기 위해 Fig. 3-10과 같은 mini-Bridge Crane을 활용하였다. Fig. 3-11는 실험 검증에 활용되는 mini-Bridge Crane을 구성하는 하드웨어 및 소프트웨어 구성 요소를 나타낸다. 하드웨어 구성 요소에서 Programmable Logic Controller(PLC)는 제안된 알고리즘을 수행하기 위해 무선 로컬 영역 네트워크에 의해 컴퓨터에 연결되고 PLC에 의해 생성된 속도 명령은 Bridge, Trolley 모터 드라이브로 전송된다. 드라이브는 PLC에서 들어오는 명령을 모터의 속도 설정 지점으로 사용한다. 모터 드라이브는 synchronous AC 모터를 사용하며 통신 모듈 및 모터 용 제어

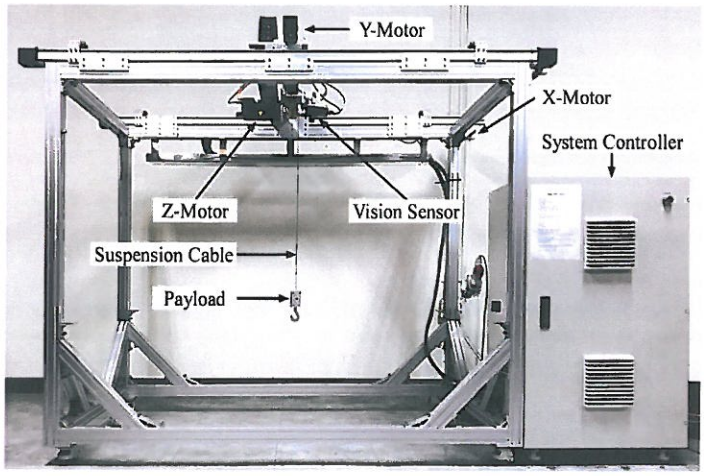


Fig. 3-10 mini-Bridge Crane

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

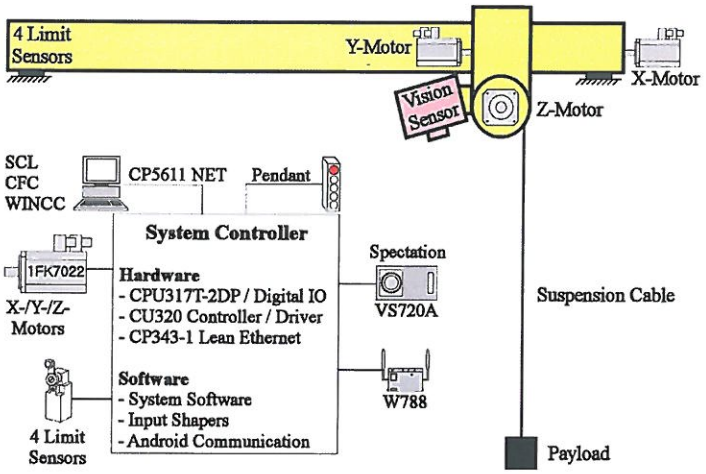


Fig. 3-11 Hardware Configuration

드라이버로 구성된다. 소프트웨어 구성 요소인 CFC, SCL 그리고 WinCC 소프트웨어는 실험 데이터를 업로드 및 다운로드하는 시스템 운영 프로그램에 사용된다. VS 720 계열의 비전 센서는 Spectation 소프트웨어를 통해 작성된 비전 프로그램으로 payload 진동의 크기를 측정하는데 사용된다.

구동기의 비선형 동적 특성을 고려한 명령을 가능한 정확하게 추적하기 위해서 모터 제어 드라이버에서 p gain은 0.25 그리고 i gain은 10ms로 시스템을 설정하였다. Fig. 3-12은 입력한 명령과 실제 mini-Bridge Crane에서 실행하는 명령의 오차가 $\pm 2cm/s^2$

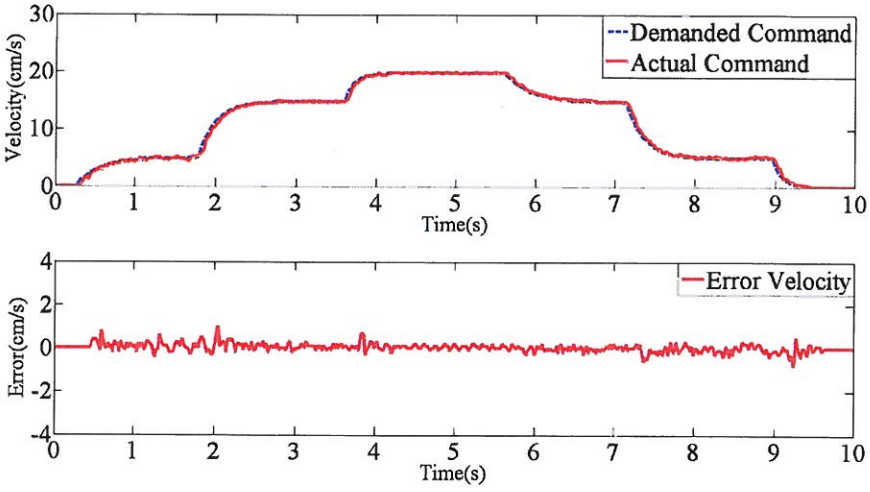


Fig. 3-12 Experimental command accuracy

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

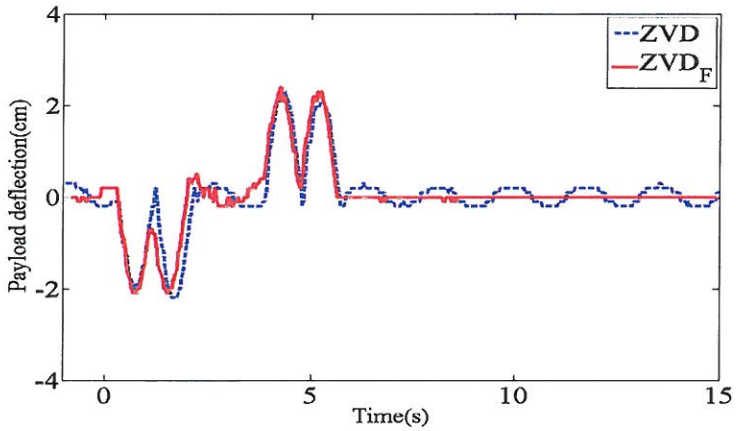


Fig. 3-13 Payload Deflection responses of ZVD and ZVD_F

범위 내로 나타남을 보여준다. 이번 실험 장치에서 ZVD_F shaper의 설계 변수는 $\tau_a = 0.517s$, $\tau_b = 0.317s$, $\tau_c = 0.117s$, $L = 0.8m$, $V_d = 0.2m/s$로 3절의 성능 평가와 똑같이 설계하였다.

본 연구에서 제시하는 shaper의 제어 성능은 수치적 및 실험적 관점에서 ZVD shaper와 EI shaper의 제어 성능과 비교한다. 속도 명령의 정확도는 실험 장치에 의해 생성된 속도 명령의 오차가 잔류 변위에 영향을 미치는 Fig. 3-12를 통해 Fig. 3-13로

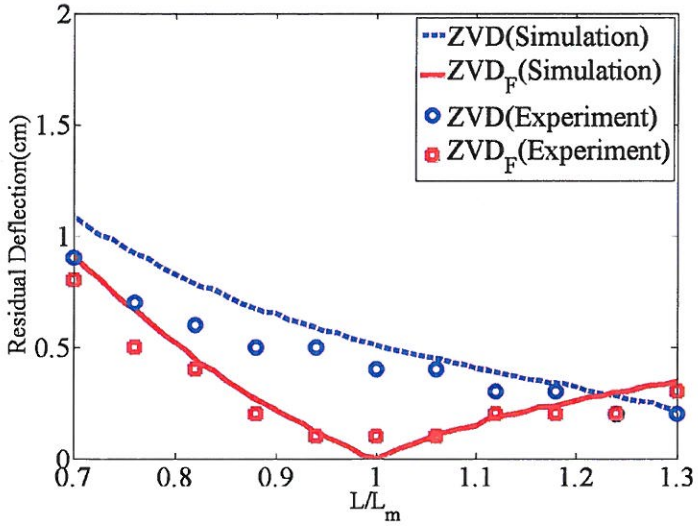


Fig. 3-14 Sensitivity of ZVD_F and ZVD shapers to L/L_m

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

나타난다. ZVD shaper와 달리 잔류 변위 감소에서 더 나은 성능이 나타나지만 약간의 오차가 발생된다.

Fig. 3-14은 ZVD_F shaper와 ZVD shaper의 줄 길이에 대한 강건성을 비교한 그림이다. ZVD_F shaper의 경우 modeling error가 없을 때 잔류변위가 0으로 나타나며 ZVD shaper의 경우 전반적으로 오른쪽으로 shift 되었다. 같은 구간을 기준으로 보았을 때 ZVD_F shaper의 경우 ZVD shaper 보다 system modeling error에 대하여 강건함을 보여준다. 실험 결과 대부분 simulation 결과를 따라 강건성을 보이지만 약간의 오차가 있는 부분은 Fig. 3-12의 실제 명령에 대한 오차에 의해 생성된 것이다.

Fig. 3-15는 ZVD_F shaper와 ZVD shaper의 첫 번째 시상수에 대해서 강건성을 비교한 그림이다. ZVD_F shaper의 경우 system modeling error가 없을 때 잔류변위가 0으로 나타나며 modeling error의 증가와 감소에 따라 잔류변위가 점점 증가한다. 반면에 ZVD shaper의 경우 시상수의 modeling error에 관계없이 일정하게 잔류변위가 유지되고 있다. 실험결과 전반적으로 numerical Simulation의 형태는 비슷하게 나타나지만 약간의 오차가 발생하는 부분은 Fig. 3-12의 velocity error에 따라 생기는 오차와 실제 크레인에서 미세한 충격이나 공기의 움직임에 의해 나타난다. ZVD shaper의 경우 최대 잔류변위는 0.7cm 까지 나타나며 전반적으로 0.6cm의 잔류변위가 나타난다.

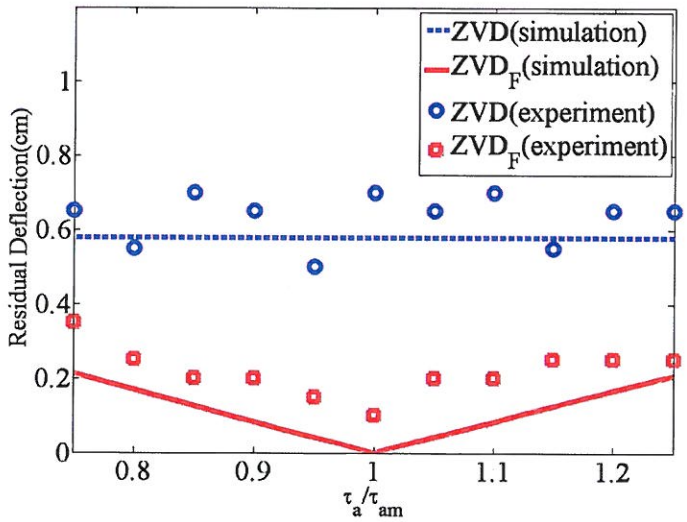


Fig. 3-15 Sensitivity of ZVD_F and ZVD shapers to τ_a/τ_{am}

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

3.5 결론

본 논문에서는 구동기의 비선형 동적 특성에 의한 잔류변위저감 성능을 고려함과 동시에 system modeling error에 대한 강건성을 포함한 ZVD_F shaper를 제시한다. ZVD_F shaper는 비선형 구동기에서 발생되는 응답을 phasor form 형태로 나타내고 vector diagram approach를 활용하여 exact solution을 개발하였다. 제어기의 성능을 평가하기 위해 설계 변수에 대한 잔류변위의 크기와 modeling error에 대한 sensitivity를 기존의 이상적인 shaper와 비교 및 검증하였다. 실제 실험 장비인 mini-Bridge Crane을 이용하여 잔류변위저감 성능과 설계 변수에 대한 강건한 결과가 나타났다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

4장. 안드로이드 기반의 원격 입력성형장치

본 논문은 유연계를 위한 잔류 진동 감소와 작업자들의 작업속도, 정확도, 안정감을 위한 터치형 원격입력장치를 제시한다. 터치형 원격입력장치는 영상센서를 통해 안드로이드에 실시간 영상을 출력하고 TCP Connection을 이용하여 SIEMENS PLC와 데이터를 송/수신하고 입력성형제어기술을 사용하여 잔류 진동을 감소시킨다. 제시한 터치형 원격입력장치를 이용하여 신속성과 직관성을 평가 및 검증한다. 제시한 터치형 원격입력장치는 mini Bridge Crane을 이용한 장애물 경로 실험을 통해 잔류 진동 감소와 단축된 작업속도 및 낮은 충돌횟수 결과가 나타났다.

4.1 서론

현재 reaction zet, piezo 구동기, 크레인 등 유연시스템의 인터페이스는 유선 형태로 이루어진 경우가 많다. 이러한 시스템은 작업자가 현장에 있어야만 조작이 가능하다는 한계와 작업자의 안전, 생산성을 저해하는 요소이다. 이러한 문제를 해결하기 위한 원격 제어는 복잡하지 않아 작업자의 효율성을 높인 효과적인 방법이다. 일반적인 인터페이스는 작업자가 현장에서의 사고에 대비하기가 어렵고 버튼 조작으로 발생되는 움직임을 지속적으로 생각하지 않으면 오류가 발생한다. 또한 유연시스템으로부터 발생되는 진동은 복잡한 작업 현장에서 사고를 초래하기 때문에 유연시스템의 잔류변위 저감과 현장의 상황을 쉽게 파악하고 단순한 조작을 하는 원격장치가 요구된다.

Guerlain[19~20]과 Dam[21]은 특정 제어 시스템의 인지 과정에 맞춘 인터페이스가 운전자에게 제공하는 유익한 효과를 증명하였다. Fig. 4-1은 현재 산업현장에서 일반적으로 사용되고 있는 인터페이스를 나타낸다. 이 인터페이스들은 유연시스템 조작의 효율을 감소시킨다. 유연시스템 제어의 효율성을 높이기 위해 Kivila[22]와 Porter는 터치스크린 패드를 이용한 Pendant Layouts, D-Pad, RC Control, Sliders, Joystick, Variable Home Joystick, Tilt 인터페이스를 제시하였다. 작업시간의 단축과 작업자가 느끼는 안정감, 편리성, 이해도 부분에서는 우수하지만 현장에 있어야만 조작이 가능하다는 한계가 있다.

Peng[23]과 Kelvin Chen Chih는 카메라의 Blob Detection Algorithm을 활용하여 막대기를 통한 유연시스템 제어를 제시하였다. 기존의 Pendant에 비해 작업시간의 단축과 충돌 횟수에서 큰 효율성을 보였으나 현장에 있어야만 조작이 가능하다는 한계와 사고에 대처하

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

(a) Pendant (b) Joystick (c) Control Levers

Fig. 4-1 Typical Crane Control Interface

기가 어렵고 사용함에 있어 민감한 부분이 있다. 또한 RFID센서를 기반으로 한 Hand Motion 유연시스템 제어를 제시했다[24~25]. 작업의 편리성과 안전성, 효율성 부분에서 우수한 제어이지만 Noise 센서로 인한 실제 Hand Motion과 측정된 유연시스템 Motion의 큰 차이를 보이는 단점이 있다.

Chi[26] 과 Hung-Lin 은 Multiple View와 가상정보를 통한 유연시스템 제어를 제시한다. 일반적인 인터페이스에 비해 작업시간의 단축과 작업자의 편리성, 효율성 부분에서 우수하지만 작업자의 숙련도가 고려되지 않아서 실제 조사에서 Multiple View에 대한 초보자들의 의견이 나누어지고 있다. Majewski[27]와 Maciej는 증강 현실과 피드백을 갖춘 대화형 음성 유연시스템 제어를 제시했다. 이 방법은 기존의 인터페이스보다 효율적이고 유연한 제어를 하지만 복잡한 산업현장에서 소음에 따른 사고의 원인이 된다.

일반적인 유연시스템 조작에 의해 발생되는 진동을 제거하기 위해 Singhose[1,3]와 Seering는 임펄스를 원하는 입력 명령과 합성곱하여 잔류변위를 저감시켰다. 위의 입력성형을 사용한 제어는 안전하고 효율적인 유연시스템의 동작을 생성한다[28].

현재 안드로이드는 전 세계적으로 스마트 폰이나 테블릿 등 다양하게 대중화 되어 있으며 방향 센서, 광 센서, 마이크, 근접 센서 등 다양한 기능을 가지고 있어 작업자의 필요한 부분에 맞게 수정이 가능하지만 크레인을 제어하는 인터페이스로는 많이 사용되지 않고 있다. 따라서 본 논문에서는 작업자에게 편이하고 안전함과 동시에 진동을 낮추어 유연시스템의 효율성을 높인 터치형 원격입력성형장치를 어플리케이션을 제시한다. 2절에서는 Vision과 Libnodave Library를 이용한 r-Pad 어플리케이션을 설계한다. 3절에서는 입력성형제어방법과 크레인 제어를 설계하고, 4절에서는 장애물 코스에 따른 신속성과 직관성 성능 평가를 하고 mini-Bridge Crane을 통한 완성 시간과 시도 횟수 실험 결과를 통해 효율성을 검증한다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

4.2 안드로이드 어플리케이션 개발

본 논문에서는 안드로이드를 기반으로 한 어플리케이션 개발을 위해 안드로이드 장비와 안드로이드 개발 프로그램인 eclipse 소프트웨어를 사용하였다.

Fig. 4-2 는 본 논문에서 제시하는 어플리케이션의 구성 모듈을 보여준다. 안드로이드와 PLC를 연결하고 데이터를 주고받는 Libnodave Library[29] 와 안드로이드에 영상을 출력하는 Vision Library[30]로 구성된 Framework를 통해 어플리케이션을 구현하였다.

Libnodave Library는 PLC사이의 회로를 규정하는 PLCinterface, 데이터 송/수신을 위한 스트림과 패킷 및 rack/slot을 설정하는 TCPConnection과 지멘스 장비와 통신 준비를 하는 S7Connection을 실행하는 DataIsoTCP는 PLC와 소켓 통신을 구성한다. 2010년 이전의 소켓 통신의 구조는 클라이언트가 서버로부터 데이터가 오기를 기다리는 형태였지만 2010년 이후 클라이언트에서는 원래의 소켓 프로그램이 수행 되고 서버에서 오는 정보는 Thread를 통해 처리된다. 소켓 통신의 구조변화는 어플리케이션의 데이터 처리 속도를 개선하여 사용자가 느끼는 어플리케이션의 동작 상태를 빠르게 처리할 수 있게 한다. 또한 PLC의 통신을 위한 데이터시트가 저장되는 Nodave와 PLC와 주고받는 데이터의 길이, 저장 주소

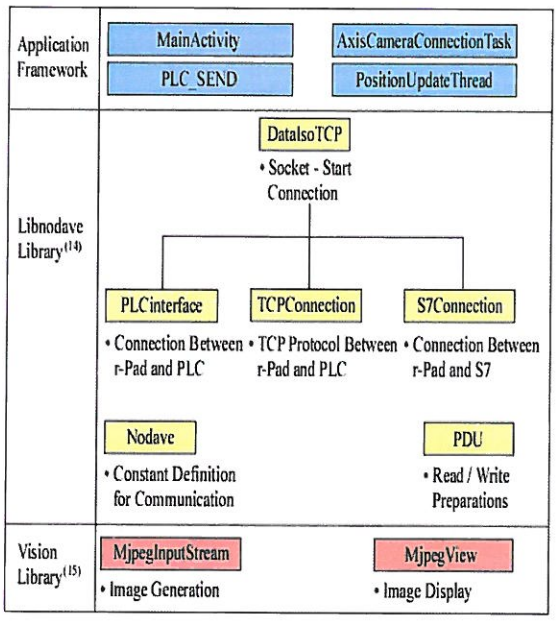


Fig. 5-2 Android Application Architecture

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

와 데이터 블록의 번호를 설정하는 PDU로 구성되었다.

Vision Library는 카메라의 영상 이미지를 생성하는 MjpegInputStream과 생성된 이미지를 화면에 출력하는 MjpegView로 구성되었다. MjpegInputStream 은 카메라의 프레임 데이터를 디코딩하여 이미지를 생성하고 이미지를 화면에 출력할 때는 일반적인 한 개의 이미지는 화면에 출력하는 모든 연산과 사용자와의 상호작용 처리 등을 메인에서 처리하지만 실시간으로 많은 데이터를 처리하는 경우 속도의 개선을 위해 하나의 프로세스에서 분리된 독립적인 Thread에서 처리한다. 이때 영상처리를 위해 SurfaceView를 상속하여 사용하였으며 더블 버퍼링 기능을 통해 처리속도를 빠르게 한다. 영상 출력을 위해 카메라의 Enable anonymous viewer login 설정과 사용자의 사용 목적이나 기기에 따라 영상의 속도를 좌우하는 해상도와 영상의 초점 조절을 설정했다.

Fig. 4-3는 본 논문에서 제시하는 안드로이드 어플리케이션의 프로세스를 보여준다. 프로그램의 응답 시간 단축과 효율성을 위해 하나의 프로세스에서 다수의 작업을 각각의 Thread를 이용하여 작동시키는 멀티 Thread를 사용하였다. 3개의 Thread를 사용하였으며 각각의 동작은 다음과 같다.

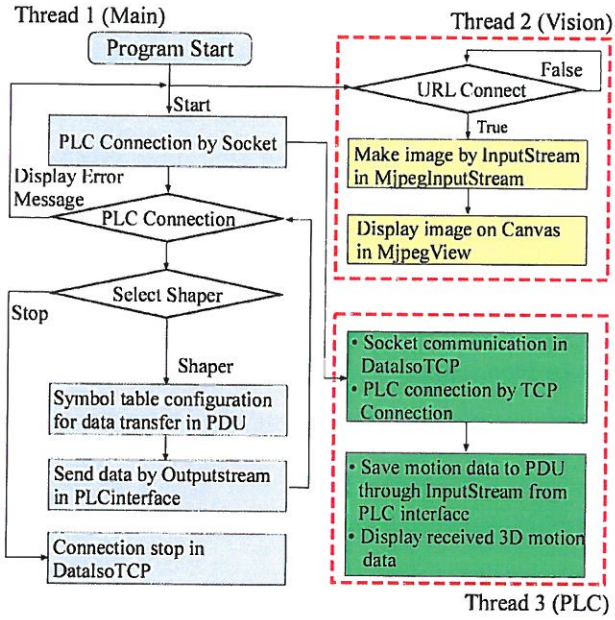


Fig. 4-3 Application Flowchart

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

- Thread 1 : Graphical User Interface를 구성하는 Main Thread이다.

- Thread 2 : 카메라와 통신을 확인하고 프레임 데이터를 받아와 디코딩 후 영상 이미지로 만들어 Android의 화면에 출력한다.

- Thread 3 : PLC와의 소켓 통신을 하고 mini Bridge Crane의 Payload 위치 데이터를 0.1초의 주기마다 업데이트 한다.

Fig. 4-4는 본 논문에서 제시하는 r-Pad의 화면을 보여준다. PLC와의 연결은 START 버튼을 누르면 정해진 PLC 주소와 소켓 통신을 한다. PLC와 연결이 되면 자동적으로 START 버튼은 빨간색 STOP 버튼으로 바뀌게 되고 PLC에 지정된 특정 주소로부터 현재 Payload의 X,Y,Z축 위치를 출력한다. STOP 버튼을 누르면 PLC와의 연결이 종료되고 Payload의 위치 데이터를 가져 오지 않으며 모든 버튼 동작을 종료한다. 또한 Origin 버튼은 PLC에서 지정한 특정 위치인 X, Y 좌표의 초기 위치로 이동하며 이때 모든 버튼의 동작이 정지된다. 방향 버튼은 X축, Y축, Z축으로 설계하였으며 Z축은 좌측 하단의 Up, Down 버튼이며 X축, Y축은 동서남북을 기반으로 작업자의 편이를 위해 대각선 버튼 설계하였다.

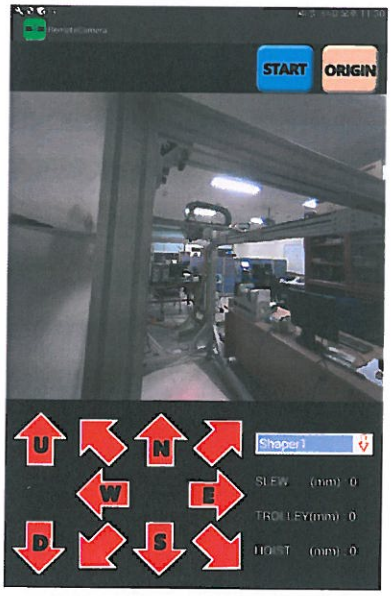


Fig. 4-4 r-Pad Screen Configuration

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

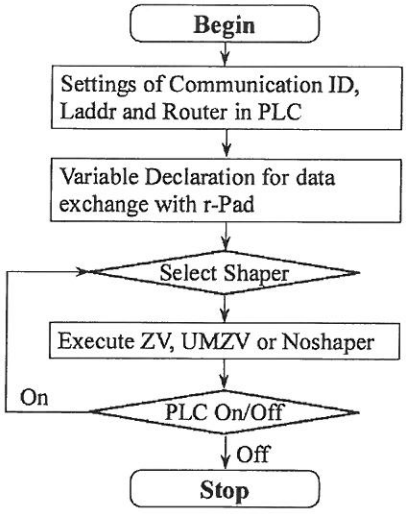


Fig. 4-5 PLC Flowchart

Fig. 4-5은 r-Pad와의 통신을 위한 설정과 mini-Bridge Crane shaper를 동작시키는 PLC의 흐름도이다. PLC 구성을 위해서 SIMATIC Manager 프로그램을 사용하였다. PLC는 r-Pad로부터 오는 통신요청을 처리하기 위한 경로를 추가하였다. 이때 지멘스 기기가 아닌 다른 외부의 장비와 통신을 할 때는 현재 장비의 네트워크 상태를 보여주는 Netpro에서 CPU의 연결을 unspecified로 설정을 한 후에 TCP 통신을 설정하였다. 이더넷 통신을 위해 Netpro의 CP343-1 Lean에서 무선 공유기 W788의 고유 IP 주소를 이용한 라우터 설정을 하였다. 그 후 데이터의 주소, 크기, 이름을 설정하고 선택된 shaper에 따라 실행하였다.

4.3 Summary of ZV and UMZV shaper

이 장에서는 유연시스템 동작에 의해 발생되는 잔류 진동을 감소시키기 위한 입력성형 방법을 설계한다. r-Pad에서는 기본적인 ZV shaper, UMZV shaper를 사용하였다. 입력성형은 입력명령을 적절하게 성형하여 시스템의 잔류 진동을 줄이는 기술로써 기본 입력 명령과 임펄스 시퀀스의 convolution으로 구현된다. 2차 시스템에 대한 단위 임펄스 응답 식을 이용하여 ZV shaper, UMZV shaper의 임펄스 크기와 시간을 구한다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

ZV shaper[11]는 첫 번째 임펄스 반응과 두 번째 임펄스 반응식의 합을 0으로 만들어 잔류 진동을 줄이는 방법으로 Command의 모양은 Fig. 4-6 (a)와 같다. 감쇠비를 0으로 설정하고 구동기의 최대 출력에 따른 입력의 크기와 임펄스 시간을 구하면 식 (4.1)으로 표시된다.

$$\begin{bmatrix} A_i \\ t_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ 0 & \frac{T}{2} \end{bmatrix} \tag{4.1}$$

여기서 $T = \frac{2\pi}{\omega_n}$, ω_n는 고유 진동수이다.

UMZV shaper[12]는 음의 임펄스 사용을 허용한 입력성형제어법이다. 0의 잔류 진동을 얻기 위한 조건을 만족하고 입력크기가 $A_i = (-1)^i$ 을 만족하는 조건을 이용한 방법으로 Command의 모양은 Fig. 4-6 (b)와 같다. 감쇠비를 0으로 설정하고 입력의 크기와 시간을 구하면 식 (4.2)으로 표현된다.

$$\begin{bmatrix} A_i \\ t_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 1 \\ 0 & \frac{T}{6} & \frac{T}{3} \end{bmatrix} \tag{4.2}$$

Fig. 4-6은 ZV shaper와 UMZV shaper의 기본 입력 명령과 임펄스 시퀀스의 convolution에 따른 입력 성형과정을 보여준다.

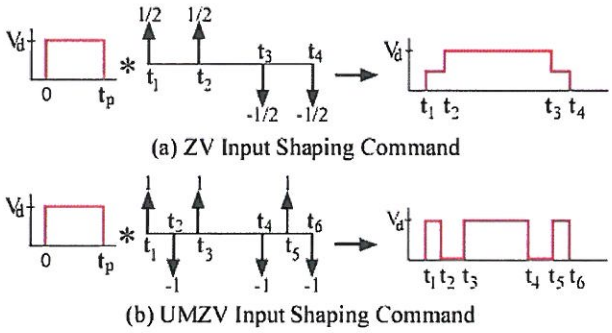


Fig. 4-6 ZV and UMZV shaper

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

4.4 실험장치

본 논문에서는 r-Pad와 통신을 위해 Siemens PLC를 사용하였다. PLC는 Fig. 4-7의 mini-Bridge Crane을 구동시키고 2m × 1m × 1m 50cm로 설계하였다. 케이블의 길이는 위의 설계된 shaper 로부터 80cm로 구성하였다. Fig. 4-8은 실험 검증에 활용되는 mini-Bridge Crane을 구성하는 하드웨어 및 소프트웨어 구성 요소를 나타낸다. 하드웨어 구성 요소에서 Programmable Logic Controller(PLC)는 제안된 알고리즘을 수행하기 위해 무선 로컬 영역 네트워크에 의해 컴퓨터에 연결되고 PLC에 의해 생성된 속도 명

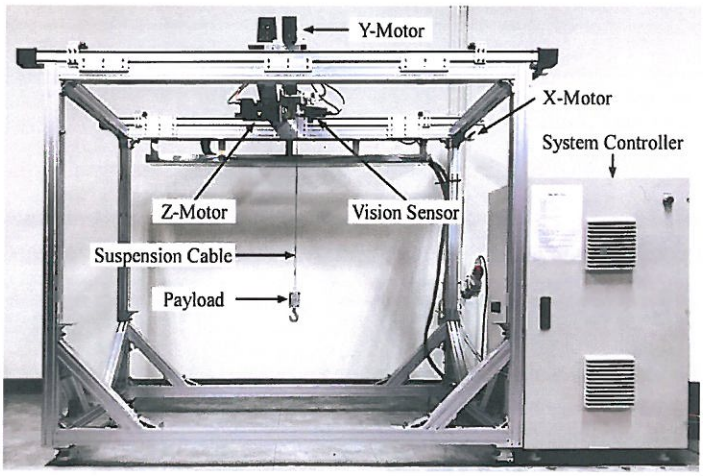


Fig. 4-7 mini-Bridge Crane

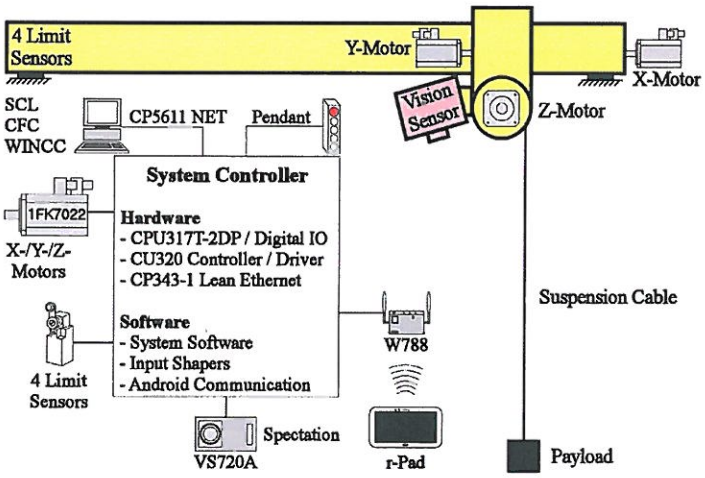


Fig. 4-8 Hardware Configuration

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Fig. 4-9 Operator Driving the Crane with Android Control

령은 Bridge, Trolley 모터 드라이브로 전송된다. 드라이브는 PLC에서 들어오는 명령을 모터의 속도 설정 지점으로 사용한다. 모터 드라이브는 synchronous AC 모터를 사용하며 통신 모듈 및 모터 용 제어 드라이버로 구성된다. 소프트웨어 구성 요소인 CFC, SCL 그리고 WinCC 소프트웨어는 실험 데이터를 업로드 및 다운로드하는 시스템 운영 프로그램에 사용된다. VS 720 계열의 비전 센서는 Spectation 소프트웨어를 통해 작성된 비전 프로그램으로 Payload 진동의 크기를 측정하는데 사용된다. Fig. 4-9는 안드로이드 원격입력장치를 사용하여 mini-Bridge Crane을 동작시키는 모습이다.

4.5 실험결과

실험 진행은 r-Pad와 Pendant의 비교와 Input Shaping의 성능을 같은 조건에서 평가하기 위해 크레인 제어 경험이 없는 일반 학부생 15명을 선발하였다. 또한 잔류변위 저감을 평가하기 위해 Noshaper, ZV, UMZV로 나누어 실험 하였다.

이번 실험의 목적인 r-Pad와 Pendant 인터페이스를 비교하여 신속성, 직관성을 검증하기 위해서 장애물 경로를 통과하는 최소시간과 낮은 충돌횟수를 측정하였다. 이때 장애물과 충돌이 일어난 경우 다시 실험을 하여 시도횟수를 측정하였다. 실험 장애물

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

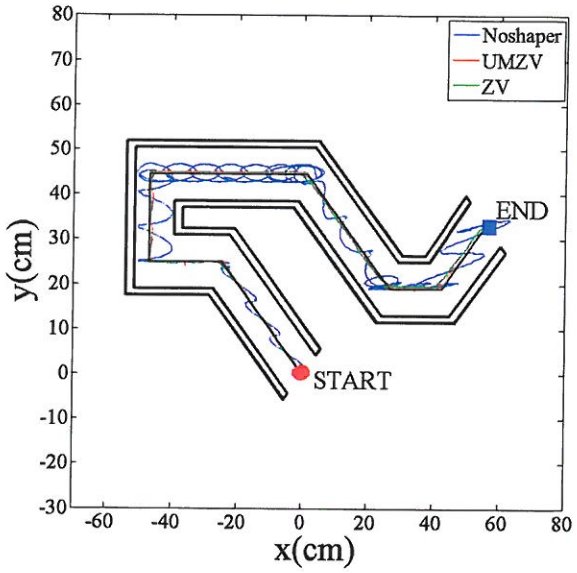


Fig. 4-10 Oscillation Comparison in Obstacle Course

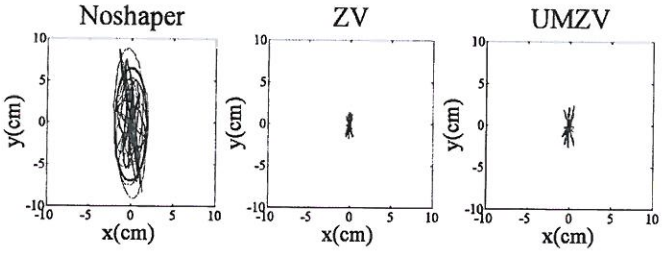


Fig. 4-11 Deflection Comparison of ZV, UMZV and Noshaper

의 경로는 Fig. 4-10과 같이 X축, Y축의 2차원 장애물로써 장애물 사이의 폭은 12cm 대각선 장애물의 각도는 45°로 초보 작업자라는 점을 고려하여 여러 번의 실험을 통해 설계하였다. 실험에 적용된 속도는 PLC의 적용된 shaper로부터 0.2m/s이다. Fig. 4-11은 shaper의 비교를 통해 잔류변위 저감을 평가하기 위해 기준 경로에서 X축, Y축으로 각각의 오차를 나타낸 것이다. 3절의 입력성형제어에서 UMZV는 ZV보다 입력성형의 시간은 빠르나 강건성이 낮은 결과에 의해 UMZV가 ZV에 비해 조금의 오차가 더 발생되었지만 큰 차이가 나타나지는 않았다. 반면에 Noshaper 경우는 X축으로는 최대 1.5cm, Y축으로는 최대 9cm의 큰 오차가 나타났다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

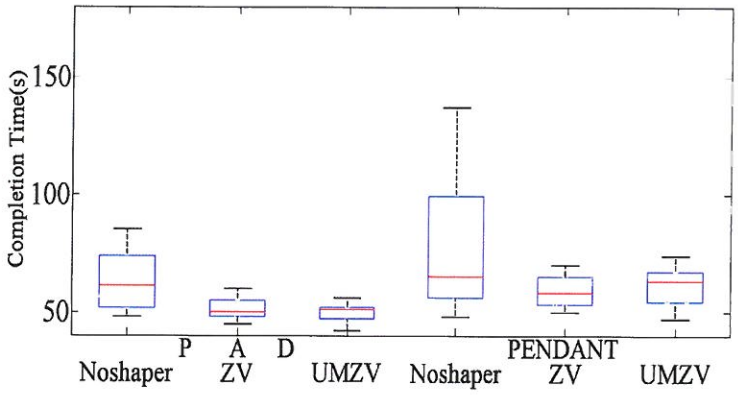


Fig. 4-12 Rapidness Comparison Between Controller and Input Unit

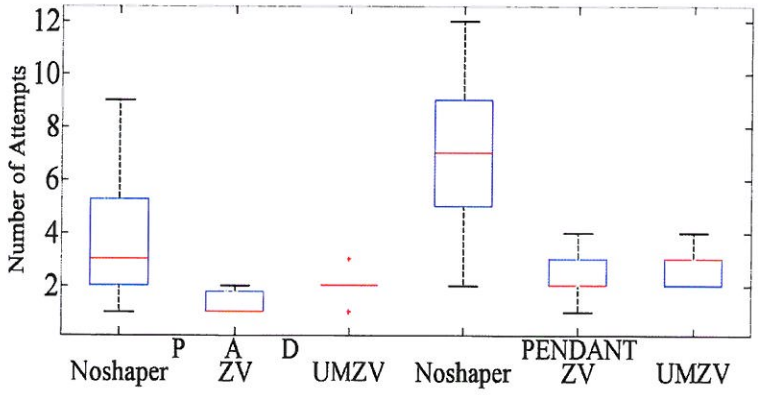


Fig. 4-13 Intuitive Comparison Between Controller and Input Unit

Fig. 4-12은 작업속도를 비교하여 신속성을 평가하기 위해 r-Pad와 Pendant를 각각 Noshaper, ZV, UMZV로 나누어서 실험하였다. r-Pad의 최대 실험시간은 85초, Pendant의 최대 실험시간은 137초로 큰 차이가 나타났다. 그리고 ZV는 48초, UMZV는 42초로 Noshaper 에 비하여 낮은 실험시간이 나타났다. r-Pad의 경우에는 UMZV 에서 최소 실험시간이 나타났으며 Pendant 경우에는 ZV에서 최소 실험시간이 나타났다. UMZV와 ZV는 15명의 학생들 간의 편차가 심하게 나타나지 않았지만 Noshaper 경우에는 편차가 크게 나타났다. Pendant의 Noshaper 경우 완성 시간이 r-Pad에 비해 편차도 매우 심하게 나타났다. Pendant 인터페이스의 버튼 조작의 어려움이 본 실험에서 나타났다.

Fig. 4-13은 충돌횟수를 비교하여 직관성을 평가하기 위해 r-Pad와 Pendant를

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Noshaper, ZV, UMZV로 나누어서 실험하였다. 시도횟수의 경우에도 Fig. 4-12와 같은 형태로 Pendant에 비해 r-Pad가 비교적 낮은 시도횟수가 나타났다. r-Pad와 Pendant 모두 UMZV와 ZV 경우에 최대 4번, 최소 1번의 시도를 하였으며 학생들 간의 편차가 낮지만 Noshaper 경우에는 최대 12번의 시도횟수와 심한 편차로 불안정한 제어가 나타났다. 실험진행시 영상을 통해 장애물의 구조를 더욱 잘 파악할 수 있다는 결과가 나타났다. 결과를 통해 우리는 r-Pad가 Pendant에 비하여 작업시간의 단축과 낮은 충돌횟수 및 Input Shaping의 잔류변위 저감을 얻을 수 있었다.

4.6 결론

본 논문에서는 산업현장에서 일반적으로 사용하고 있는 Pendant의 효율성, 안정감을 고려한 r-Pad를 제시하였다. r-Pad는 PLC와 통신을 위해서 Libnodave Library를 활용하여 데이터를 송/수신 하고 Vision Library를 통해 카메라의 영상을 출력, 잔류변위 저감을 위해 원격입력성형장치를 개발하였다. r-Pad의 성능을 평가하기 위해 일반 학생을 대상으로 신속성과 직관성 실험을 통해 검증 하였다. 우리는 실제 실험 장비인 mini Bridge Crane을 이용한 2차원 경로 장애물의 실험에서 잔류진동의 감소와 작업시간의 단축 및 충돌 횟수의 단축 결과가 나타났다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

5장. 결론 및 향후 연구 계획

본 논문에서는 유연시스템의 구동기 드라이브 가속도 제한과 구동기의 1st-order 비선형 dynamics로부터 발생되는 응답을 근사화하고 Phasor form 벡터로 나타내 이를 Vector diagram approach를 이용하여 system modeling error에 대해 강건한 Exact solution을 제시하였다. 그리고 산업현장에서 작업자의 안전성과 작업의 효율성을 위해 Libnodave, Vision Library를 통해 크레인과 데이터를 송/수신하고 크레인의 잔류변위를 제어하는 입력성형방법을 포함한 r-Pad를 제시하였다.

유연시스템의 가속도 제한을 고려함과 동시에 system modeling error에 대해 강건성을 가지는 ZVD_{AL} shaper와 EI_{AL} shaper를 제시하였으며 mini-Bridge Crane을 통하여 기존의 ZVD shaper, EI shaper와 비교 분석한 결과 system modeling error에 대한 강건성과 잔류변위 저감에 있어 기존의 입력성형방법보다 우수한 성능이 나타났다.

유연시스템의 비선형 구동기에 따른 1st-order를 고려함과 동시에 system modeling error에 대해 강건성을 가지는 ZVD_F shaper를 제시하였으며 mini-Bridge Crane을 통하여 기존의 ZVD shaper와 비교 분석한 결과 system modeling error에 대한 강건성과 잔류변위 저감에 있어 기존의 입력성형방법보다 우수한 성능이 나타났다.

산업현장에서 일반적으로 사용되는 Interface의 효율성, 안전성을 고려한 r-Pad Interface는 Library를 활용하여 크레인 제어, 카메라 영상 출력, 시스템의 잔류변위 저감을 위한 입력성형방법을 포함한 원격입력장치로써 mini-Bridge Crane을 통해 기존의 Pendant Interface와 비교분석한 결과 작업시간과 충돌 횟수를 단축하는데 있어 우수한 성능이 나타났다.

본 연구에서는 비선형 시스템에 대한 강건한 입력성형제어기를 개발할 때 기본 shaper의 임펄스를 가정하였으나 이를 가정하지 않은 exact solution 연구가 필요하며 비선형 시스템의 1st-order를 고려한 EI_F shaper의 경우 $|\overrightarrow{V_1}| = |\overrightarrow{V_3}|$를 만족할 시 기본 EI shaper와 성능이 똑같은 결과가 나타난다. 이에 대한 연구가 더 필요하며 현재까지 개발한 shaper를 원격 입력성형장치에 적용하여 실제 구동기에 대한 잔류저감 성능을 극대화 하는 것이 필요하다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Reference

(1) Singer, Neil C. and Warren P., 1990, "Preshaping command inputs to reduce system vibration.", Journal of dynamic systems, measurement, and control, 112.1, pp. 76-82.

(2) Singhose, William, Steve Derezinski, and Neil Singer., 1996, "Extra-insensitive input shapers for controlling flexible spacecraft." Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 19.2, pp. 385-391.

(3) Singhose, W. E., W. P. Seering. and Neil C. Singer., 1997, "Time-optimal negative input shapers." Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 119.2, pp. 198-205.

(4) Singhose, William, Warren Seering, and Neil Singer., 1994, "Residual vibration reduction using vector diagrams to generate shaped inputs." Journal of Mechanical Design 116.2, pp. 654-659.

(5) Singhose, William E., Warren P. Seering, and Neil C. Singer., 1990, "Shaping inputs to reduce vibration: a vector diagram approach." Robotics and Automation, Proceedings., IEEE International Conference on. IEEE, pp. 922-927.

(6) Lawrence, J., W. Singhose, and K. Hekman., 2008, "Command shaping under nonsysmetrical acceleration and braking dynamic." Journal of Vibration and Acoustics 130.

(7) Sorensen, K., 2008, "Operational Performance Enhancement of Human Operated Flexible Systems", Ph.D. Thesis, Georgia Institute of Technology.

(8) Kinceler, R., Meckl, P. H., 1995, "Input shaping for nonlinear systems." In American Control Conference 1, pp. 914-918.

(9) Sung, Y-G., and W. E. Singhose., 2009, "Robustness analysis of input shaping

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

commands for two-mode flexible systems." IET Control Theory & Applications, Vol. 3, No. 6, pp. 722-730.

(10) Robertson, Michael James., 2005, "Command generation for tethered satellite systems.", Diss. Georgia Institute of Technology.

(11) Danielson, Jon David., 2008, "Mobile boom cranes and advanced input shaping control.", Ph.D. Thesis, Georgia Institute of Technology.

(12) Danielson, Jon, Jason Lawrence, and William Singhose., 2008, "Command shaping for flexible systems subject to constant acceleration limits." Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control 130.5.

(13) Singhose, William, Steve Derezinski, and Neil Singer., 1996, "Extra-insensitive input shapers for controlling flexible spacecraft." Journal of Guidance, Control, and Dynamics 19.2, pp. 385-391.

(14) Blackburn, D. F., Singhose, W., Kitchen, J. P., Petrangenaru, V. P., Lawrence, J., Kamoi, T., & Taura, A., 2006, "Advanced input shaping algorithm for nonlinear tower crane dynamics." In Eighth International Conference on Motion and Vibration Control, Daejeon, Korea.

(15) Slotine, Jean-Jacques E., and Weiping Li., 1991, "Applied nonlinear control." Englewood Cliffs, NJ: Prentice hall, 199.1.

(16) Sorensen, Khalid, and William Singhose., 2007, "Oscillatory effects of common hard nonlinearities on systems using two-impulse ZV input shaping." American Control Conference, 2007. ACC'07. IEEE,

(17) Fortgang, Joel, and William Singhose., 2001, "The combined use of input shaping and nonlinear vibration absorbers." IFAC Proceedings Volumes 34.6, pp. 345-350.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

(18) Lawrence, Jason William., 2006, "Crane oscillation control: nonlinear elements and educational improvements.", Ph.D. Thesis, Georgia Institute of Technology.

(19) Guerlain, S., Jamieson, G. A., Bullemer, P., and Blair, R., 2002, "The MPC Elucidator: A case study in the design for human-automation interaction." IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans, Vol. 32, No. 1, pp. 25~40.

(20) Jamieson, Greg A., 2007, "Ecological interface design for petrochemical process control: An empirical assessment." IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans, Vol. 37, No.6, pp. 906~920.

(21) Stijn B. J. Van Dam., Max Mulder. and M. M. van Paassen., 2008, "Ecological interface design of a tactical airborne separation assistance tool." IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans, Vol. 38, No. 6, pp 1221~1233.

(22) Kivila, A., Porter, C. and Singhose, W., 2013, "Human operator studies of portable touchscreen crane control interfaces.", Industrial Technology (ICIT), 2013 IEEE International Conference on, pp. 88~93

(23) Peng, K. C. C. and Singhose, W., 2009 "Crane control using machine vision and wand following." Mechatronics, 2009. ICM 2009. IEEE International Conference on, pp. 1~6

(24) Peng, K. C. C., Singhose, W., Gessesse, S., and Frakes, D., 2009 "Crane operation using hand-motion and radio frequency identification tags." Control and Automation, 2009. ICCA 2009. IEEE International Conference on, pp. 1110~1115

(25) Peng, K. C. C., Singhose, W. and Frakes, D. H., 2012, "Hand-motion crane control using radio-frequency real-time location systems." IEEE/ASME Transactions on

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Mechatronics, Vol. 17, No. 3, pp. 464~471.

(26) Chi, H. L., Chen, Y. C., Kang, S. C., and Hsieh, S. H., 2012 "Development of user interface for tele-operated cranes." Advanced Engineering Informatics, Vol. 26, No. 3, pp. 641~652.

(27) Majewski, M. and Kacalak, W., 2016, "Building innovative speech interfaces using patterns and antipatterns of commands for controlling loader cranes." Computational Science and Computational Intelligence (CSCI), 2016 International Conference on, pp. 525~530

(28) Khalid, A., Huey, J., Singhose, W. E. and Lawrence, J., 2006, "Human operator performance testing using an input-shaped bridge crane." Journal of Dynamic systems, Measurement, and Control, 128.4, pp. 835~841.

(29) T. Hergenhahn, "Exchange data with Siemens PLCs", 2014, http://libnodave.sourceforge.net/

(30) Choi, J. Y., Lee, S. J. and Jeon, B. C., 2010, "Home Network Application using Android Mobile Platform." The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication, Vol. 10, No. 4, pp. 7~15.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

APPENDIX A

A. Pendulum System

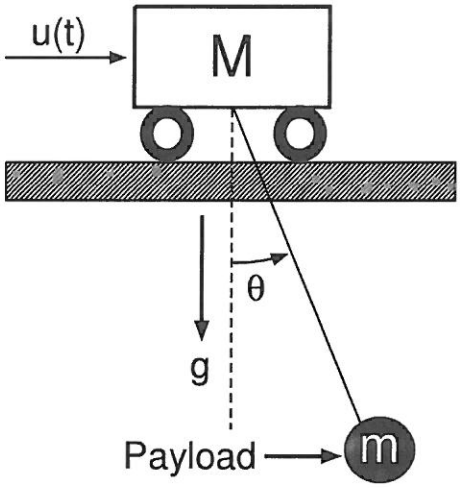


Fig. A-1 Pendulum modeling

Fig. A-1과 같은 일반적인 Pendulum 모델에 대한 식을 Lagrange equation을 이용하여 L을 계산하면 다음과 같다.

$$T = \frac{1}{2}M\dot{x}^2 + \frac{1}{2}m\left(\dot{x}_p^2 + \dot{y}_p^2\right) = \frac{1}{2}(M+m)\dot{x}^2 + mL\dot{x}\dot{\theta}cos(\theta) + \frac{1}{2}mL^2\dot{\theta}^2$$

$$V = -mglcos(\theta)$$

$$L = T - V = \frac{1}{2}(M+m)\dot{x}^2 + mL\dot{x}\dot{\theta}cos(\theta) + \frac{1}{2}mL^2\dot{\theta}^2 + mgLcos(\theta)$$

Payload의 변위에 대하여 모델링하기 때문에 x 좌표에 대한 도함수 수식을 제외하고 Lagrange L을 이용하여 θ에 대하여 도함수를 계산하면 다음과 같다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

$$\frac{d}{dt}\frac{\vartheta L}{\vartheta \dot{\theta}} - \frac{\vartheta L}{\vartheta \theta} = mL\ddot{\theta} + mgLsin(\theta) - MLcos(\theta)\ddot{x} = 0$$

θ에 대한 도함수 식에서 M과 m은 x와 θ에 거의 영향을 주지 않기 때문에 소거하고 양변에 L을 나누어주면 다음과 같다.

$$L\ddot{\theta} + g^{*}\sin(\theta) = \ddot{x}cos(\theta)$$

위의 식을 비선형 상태 방정식 형태로 바꾸면 다음과 같다. 여기서 $\vec{x} = [\theta\ \dot{\theta}\ x\ \dot{x}]^T$, $\vec{u} = [\ddot{x}]$이다.

$$\dot{\vec{x}} = f(\vec{x}, \vec{u})$$

위의 두 개의 식을 이용하여 상태 변수 방정식으로 풀면

$$\dot{x}_1 = x_2$$

$$\dot{x}_2 = -\frac{g}{L}sin(x_1) + \frac{1}{L}u_1\cos(x_1)$$

$$\dot{x}_3 = x_4$$

$$\dot{x}_4 = u_1$$

시스템의 선형 모델을 얻기 위해서 x_1 = 0을 대입하여 다음의 선형 상태 방정식을 얻을 수 있다.

$$\dot{\vec{x}} = A\vec{x} + B\vec{u}$$

여기서 A와 B는 다음과 같이 표현된다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -g/L & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \qquad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1/L \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

APPENDIX B

B. Vector Diagram Approach

시간에 따른 임펄스열을 극좌표 $r-\theta$로 나타낸 것으로 임펄스의 크기는 Vector의 크기, 임펄스의 시간은 각도로 표시한다. 이 방법은 설계과정을 단순화하기 위해 Vector Calculus를 이용하여 exact solution을 결정하기 위해 개발되었다[4~5]. Fig. 1-9 (a)의 임펄스열을 (b)의 Vector 영역으로 표시하면, 시간영역의 A_1과 A_2는 Vector diagram의 V_1과 V_2로 나타나고 t_1 과 t_2는 θ_1 과 θ_2로 나타난다.

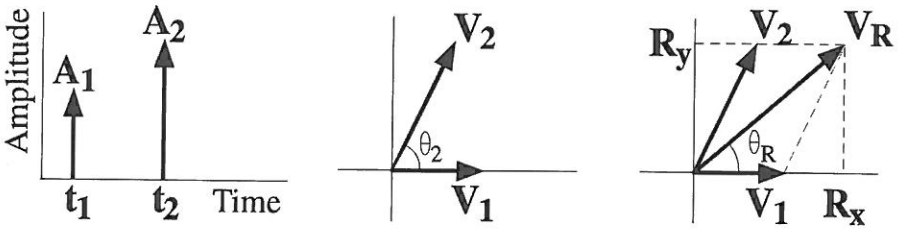
$$R_x = \sum A_i \cos\theta_i \tag{1.16}$$

$$R_y = \sum A_i \sin\theta_i \tag{1.17}$$

벡터의 x축과 y축의 합은 식 (1.16)과 식 (1.17)로 나타나고 식 (1.16)과 식 (1.17)을 이용하여 Fig. B-1 (c)에서 합 벡터의 크기는 식 (1.18)로 나타나고 합 벡터의 각도는 식 (1.19)이다.

$$A_{n+1} = \sqrt{R_x^2 + R_y^2} \tag{1.18}$$

$$\theta_{n+1} = \pi + \tan^{-1}\left(\frac{R_y}{R_x}\right) \tag{1.19}$$

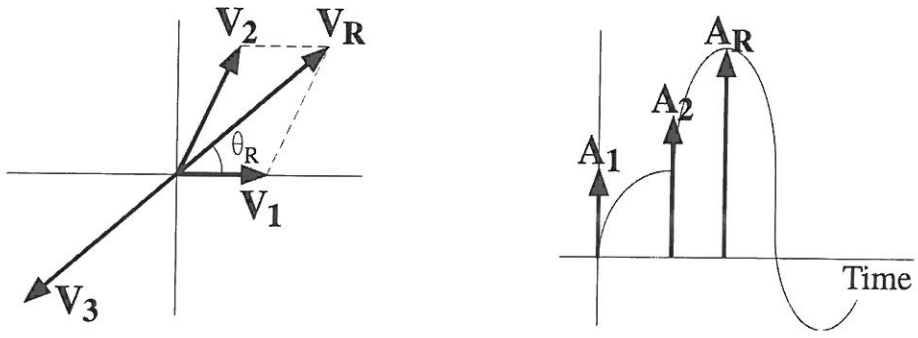


(a) Impulse Sequence (b) Vector Diagram (c) Vector Diagram

Fig. B-1 Vector Diagram Approach

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



(a) Vector Diagram (b) Response of Impulse

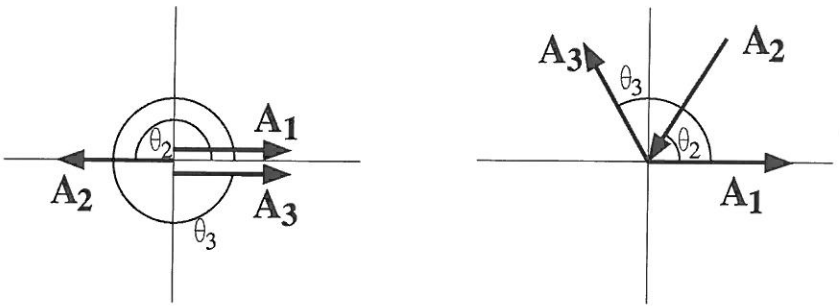
Fig. B-2 Response of Vector Diagram Approach

Fig. B-2 (a)와 같이 V_R의 크기에 따라 Impulse Sequence에 의해 잔류변위는 Fig. B-2 (b)로 나타난다. 벡터선도는 벡터의 합력에 대한 응답을 벡터합으로 추정 가능하며 합벡터를 0으로 만들어 잔류진동을 제거하는 방법으로 입력성형제어기를 설계함에 있어서 유용하게 사용된다. Fig. B-3 (a)와 (b)는 ZV, ZVD shaper를 Vector Diagram으로 표현한 것으로 벡터의 합이 0이 되는 θ를 구하면, 임펄스의 크기와 시간을 쉽게 결정 할수 있다. Fig. B-3 (a) EI shaper는 벡터의 합이 허용잔류오차인 $V_{\lim}$가 되어야 한다. $V_{\lim}$의 값이 증가할수록 θ_2 와 θ_3가 감소한다. Fig. B-3 (b)는 음의 임펄스를 허용한 입력성형제어기로써 A_2가 음수이므로 화살표의 방향이 반대이다.

(a) Vector Diagram of ZV shaper (b) Vector Diagram of ZVD shaper

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



(c) Vector Diagram of EI shaper (d) Vector Diagram of UMZV shaper

Fig. B-3 Vector Diagram Approach

Collection @ chosun