creative commons
COMMONS DEED

저작자표시-비영리-동일조건변경허락 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

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

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

동일조건변경허락. 귀하가 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공했을 경우에는, 이 저작물과 동일한 이용허락조건하에서만 배포할 수 있습니다.

- 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]I804:24011-200000241269

2011년 2 월
석사학위 논문

유연시스템의 비선형 구동기의 동적 특성을 고려한 적응 입력성형제어기

조선대학교 대학원

기계공학과

김 득 현

유연시스템의 비선형 구동기의 동적 특성을 고려한 적응 입력성형제어기

Adaptive input shaping for flexible systems with nonlinear actuators

2011년 2월

조선대학교 대학원

기계공학과

김 득 현

유연시스템의 비선형 구동기의 동적 특성을 고려한 적응 입력성형제어기

지도교수 성 윤 경

이 논문을 석사학위신청 논문으로 제출함.

2010년 10월

조선대학교 대학원

기계공학과

김 득 현

김득현의 석사학위논문을 인준함

위원장　조선대학교　교수　이 규 태　인

위　원　조선대학교　교수　장 완 식　인

위　원　조선대학교　교수　성 윤 경　인

2010년　11월

조선대학교 대학원

목 차

List of Figures ····· V
List of Tables ····· Ⅷ
Nomenclature ····· Ⅸ
Abstract ····· X

제 1 장 서 론 ····· 1

제 1 절 연구 필요성 ····· 1

제 2 절 연구 배경 ····· 2

제 3 절 연구 목적 및 구성 ····· 5

제 2 장 검증 모델 ····· 6

제 1 절 Benchmark flexible system ····· 6

제 2 절 Experimental Testbed ····· 10
1. MINI-CRANE ····· 10
2. System Program ····· 12

제 3 장 비선형 구동기에 대한 입력성형제어기 17

제 1 절 소개 18

제 2 절 입력성형제어기 20

1. Negative 입력성형제어기 21

2. Robust 입력성형제어기 23

제 3 절 비선형 구동기의 동적 특성 25

제 4 절 NUMZV controller 27

1. NUMZV 제어기 개발 27

2. NUMZV 제어기 평가 38

3. NUMZV 제어기 실험적 검증 41

제 5 절 NUMZVD controller 42

1. NUMZVD 제어기 개발 43

2. NUMZVD 제어기 평가 47

3. NUMZVD 제어기 실험적 검증 48

제 6 절 결 론 49

제 4 장 비선형 구동기에 대한 적응입력성형제어기 ····· 50

제 1 절 소개 ····· 50

제 2 절 Adaptive UMZVc controller ····· 53
1. Mathematical modeling ····· 53
2. Parameter estimation of 1st-order actuators ····· 57
3. Adaptive UMZVc 제어기 평가 ····· 60
4. Adaptive UMZVc 제어기 실험적 검증 ····· 62

제 3 절 Adaptive NUMZV controller ····· 66
1. Mathematical modeling ····· 66
2. Parameter estimation of 2nd-order actuators ····· 69
3. Adaptive NUMZV 제어기 평가 ····· 74
4. Adaptive NUMZV 제어기 실험적 검증 ····· 77

제 4 절 결 론 ····· 81

제 5 장 결 론 및 향후 연구계획 ····· 82

제 1 절 결 론 ····· 82

제 2 절 향후 연구계획 ····· 83

REFERENCES 84

APPENDIX A 89
APPENDIX B 91
APPENDIX C 93

LIST OF FIGURES

Fig. 2-1 Mini-crane for test-bed ····· 6
Fig. 2-2 Mini-crane modeling ····· 6
Fig. 2-3 A hardware configuration ····· 10
Fig. 2-4 A software connection ····· 11
Fig. 2-5 A flowchart of system program ····· 13
Fig. 2-6 Upload process ····· 14
Fig. 2-7 Download process ····· 14
Fig. 2-8 Vision sensor calibration ····· 15
Fig. 2-9 Curve fitting for the focal length(6mm) ····· 16
Fig. 2-10 Curve fitting for the focal length(4mm) ····· 16
Fig. 3-1 Input shaping theory ····· 19
Fig. 3-2 UMZV shaper ····· 21
Fig. 3-3 Position response to ZV and UMZV shaper ····· 22
Fig. 3-4 Sensitivity curve ····· 24
Fig. 3-5 Input shaping process with nonlinear actuator ····· 26
Fig. 3-6 Velocity profiles by nonlinear actuator ····· 26
Fig. 3-7 Development process to NUMZV ····· 27
Fig. 3-8 Control input process to planar crane ····· 28
Fig. 3-9 A pendulum system ····· 29
Fig. 3-10 Desired and actual velocity profile of NUMZV shaper ····· 30
Fig. 3-11 Nonlinear velocity command for analysis ····· 31
Fig. 3-12 Vector diagram ····· 32
Fig. 3-13 Amplitude of β_1 for analysis(ω_1 and ω_2) ····· 35

Fig. 3-14 Amplitude of β_1 for analysis(ζ_1 and ζ_2) ····· 35
Fig. 3-15 Range of n and m of NUMZV shaper ····· 37
Fig. 3-16 NUMZV shaper to ω_n ····· 38
Fig. 3-17 Residual vibration comparison ω_1 and t_p ····· 39
Fig. 3-18 Residual vibration comparison ω_1 and ω_2 ····· 39
Fig. 3-19 Residual vibration comparison ζ_1 and t_p ····· 39
Fig. 3-20 Residual vibration comparison ζ_1 and ζ_2 ····· 39
Fig. 3-21 Experimental sensitivity comparison ····· 41
Fig. 3-22 Experimental residual vibration to t_p ····· 41
Fig. 3-23 Nonlinear unit magnitude zero vibration derivative shaper ····· 42
Fig. 3-24 NUMZVD shaper to ω_n ····· 45
Fig. 3-25 Time response of NUMZVD shaper ····· 47
Fig. 3-26 Shaped velocity command of NUMZVD shaper ····· 47
Fig. 3-27 Experimental sensitivity comparison ····· 48
Fig. 4-1 Adaptive input shaping scheme for flexible systems ····· 51
Fig. 4-2 Transfer function of a pendulum system ····· 55
Fig. 4-3 Benchmark of a pendulum system ····· 55
Fig. 4-4 Schematic diagram of UMZVa shaper ····· 60
Fig. 4-5 Estimation of 1st-order parameters ····· 61
Fig. 4-6 Error of parameter estimation ····· 61
Fig. 4-7 Block diagram with nonlinear driver settings ····· 63
Fig. 4-8 Velocity profiles ····· 63
Fig. 4-9 Convergence of parameter estimation ····· 63
Fig. 4-10 Response comparison of UMZVa and UMZV ····· 63

Fig. 4-11 Y axis deflection of rectangular trajectory ····· 64
Fig. 4-12 X axis deflection of rectangular trajectory ····· 64
Fig. 4-13 Payload deflection trajectory UMZV shaper ····· 64
Fig. 4-14 Payload deflection trajectory UMZVa shaper ····· 64
Fig. 4-15 Schematic diagram of NUMZVa shape ····· 74
Fig. 4-16 Estimation of 2nd-order parameters(ζ_1 and ζ_2) ····· 76
Fig. 4-17 Estimation of 2nd-order parameters(ω_1 and ω_2) ····· 76
Fig. 4-18 Error of parameter estimation(ζ_1 and ζ_2) ····· 76
Fig. 4-19 Error of parameter estimation(ω_1 and ω_2) ····· 76
Fig. 4-20 Block diagram with nonlinear driver settings ····· 77
Fig. 4-21 Velocity profiles ····· 78
Fig. 4-22 Convergence of parameter estimation(ζ_1 and ζ_2) ····· 78
Fig. 4-23 Convergence of parameter estimation(ω_1 and ω_2) ····· 78
Fig. 4-24 Response comparison of NUMZVa and UMZV ····· 78
Fig. 4-25 Y axis deflection of rectangular trajectory ····· 79
Fig. 4-26 X axis deflection of rectangular trajectory ····· 79
Fig. 4-27 Payload deflection trajectory UMZV shaper ····· 79
Fig. 4-28 Payload deflection trajectory NUMZVa shaper ····· 79

LIST OF TABLE

Table 2-1 Information of MINI-CRANE ····· 11
Table 2-2 Experimental measurement(focal length: 6mm) ····· 15
Table 2-3 Experimental measurement(focal length: 4mm) ····· 15
Table 3-1 Numerically determined negative input shaper ····· 44
Table 3-2 Impulse time calculation of NUMZVD shaper ····· 45
Table 4-1 True parameters of numerical simulation ····· 61
Table 4-2 True parameters of numerical simulation ····· 74

NOMENCLATURE

$G_a(s)$	Transfer function of nonlinear actuator
$G_s(s)$	Transfer function of pendulum system
$Y(s)$	Output
$U(s)$	Input
T	Period
ζ	Damping ratio
ω_n	Natural frequency
A_i	Amplitudes of impulses
t_i	Time locations of impulses
θ_{ss}	Steady-state response
A	Magnitude of vector
$\varnothing$	Phase of vector
v_t	Actual velocity profile
L	Suspension length
$g_i(t)$	Segments of actual velocity profile
$V_{\max}$	Maximum velocity
τ_a	Acceleration time constants
τ_b	deceleration time constants
ζ_1	2nd-order response function parameter of positive impulse
ζ_2	2nd-order response function parameter of negative impulse
ω_1	2nd-order response function parameter of positive impulse
ω_2	2nd-order response function parameter of negative impulse
t_p	pulse duration

ABSTRACT

Adaptive input shaping for flexible systems with nonlinear actuators

Kim, Deuk-Hyeon

Advisor : Professor Sung, Yoon-Gyung

Department of Mechanical Engineering,

Graduate School of Chosun University

In order to improve the efficiency of energy and productivity of flexible systems such as cranes, manufacturing systems of large crystal panels, etc., the control algorithms have been proposed for residual deflection reduction with ideal actuator performance. In fact, the industrial actuators which are mostly motors present 1st-order or 2nd-order dynamics under external loads. For the high control performance under non-ideal actuators, the control mechanisms are presented. The control algorithms are validated with a benchmark model and an experimental test-bed.

Firstly, an input shaping controller is developed for the non-ideal dynamics of the industrial actuators by utilize the 2nd-order response function to step input and vector diagram approach. For the consistent control performance to the variation of design parameters of the input shaper, a numerical optimization method is proposed by using two more impulses and curve fitting approach. The input shapers for rest-to-rest operations are presented.

Secondly, an adaptive input shaper is proposed by using the recursive least square method to estimate the parameters of non-ideal actuators. The

adaptive input shaper is digitized for the practical control implementation by placing the impulse time locations closely matched to the sampling frequency. In the experimental verifications, the proposed algorithm is shown that the ocillatory deflection on rectangular trajectory is reduced by 50% with respect to the input shaper based on ideal actuator performance.

제 1 장 서 론

제 1 절 연구 필요성

산업 현장에 설치된 많은 유연시스템은 연료 절감과 효율성을 극대화 시키기 위해 고중량의 payload을 운반하거나, 운반 동작 속도를 증가 시켰다. 따라서 고중량물과 운반속도에 의해서 작업자나 구조물의 사건사고 발생률 또한 증가 하게 되었다. 이에 대해 유연시스템의 payload의 잔류변위를 저감하여 안전성을 확보할 필요가 있다.

특히 payload의 잔류변위를 저감하기 위해서 불필요한 센서 없이 시스템의 주파수만을 이용한 feed-forward technique(etc. input shaping)을 활용했다. 그러나 이론적인 지식을 기반으로 설계된 linear input shaping control[1-15]은 실제 산업현장의 비선형 시스템[23-24]에 대응하기 힘들다. 이런 문제 때문에 강인성을 포함한 robust input shaper[16-17]가 개발되었고, 산업현장의 비선형 시스템에 대응하게 되었지만 robust input shaper의 제어 시간이 증가되어 효율성이 떨어진다.

따라서 산업현장의 비선형 시스템에 대에 대응하기 위해서는 독립적인 비선형 구동기의 동적특성을 고려한 제어기가 필요하고, feed-forward technique(etc. input shaping)가 포함된 Adaptive 제어 기술 개발이 필요하다. adaptive input shaping control[28-31]은 제어대상인 시스템의 수학적 모델에 미지(unknown)의 불확실성(uncertainty)이 존재하는 경우에 대하여, 제어기의 구조나 제어 parameter를 적절하게 변경하여 주어진 요구 성능을 만족한다.

adaptive control은 산업현장의 비선형 유연시스템의 payload 속도, 변위 비선형 구동기의 속도 데이터를 통해 비선형 구동기의 동적특성을 고려한 입력성형제어기들의 impulse 위치를 조율함으로써 실시간으로 비선형 시스템에 대응하여 payload의 잔류변위를 저감시키는데 큰 효과가 있다.

제 2 절 연구 배경

대부분의 유연시스템은 고속으로 동작하면 잔류변위가 발생하여 다음과 같은 문제가 야기된다. 첫째, 잔류변위는 기계의 마모와 피로를 가져와 유연시스템의 수명을 단축시킨다. 둘째, 유연시스템은 잔류변위가 완전히 멈출 때까지 다음 작업을 수행할 수 없으므로, 작업 속도가 저하된다.

따라서, 오래전부터 변위문제를 포함하고 있는 시스템의 잔류변위를 없애기 위해 많은 연구가 진행되어 왔다.

▪ 입력성형제어기

유연시스템의 변위현상을 저감하기위해 1985년 처음으로 Smith가 Posicast방법을 개발하였다.[1-2] posicast방법은 step input을 두 단계로 나누어 잔류변위를 제거한다. 그러나, 시스템 매개변수의 modelling error에 대해 강인성이 미흡하여 실용성이 낮게 나타났다. modeling error에 대해 제어성능을 개선하기 위해 Singer와 Seering은 Smith의 입력성형제어기를 개발하였다.[3-4] 입력성형제어기는 유연시스템의 연속된 임펄스가 시스템에 가해지면, 각각의 임펄스 응답이 서로 중첩되어 잔류변위가 서로 상쇄되는 원리를 이용하였다.

▪ Negative 입력성형제어기

양에 입력을 갖는 입력성형제어기(Positive input shaper)들은 시스템 modeling error에 대해 강인성을 가지고 있으나 변위제어 시간이 증가되었으며, on-off 시스템에 대응하기 어렵다. 따라서 음에 입력을 추가하여 변위제어 시간을 줄이고, on-off 시스템에 대응 할 수 있는 Negative 입력성형제기(UMZV)[13]가 제시 되었다.

▪ Multi-Mode 입력성형제어기

대부분의 실제 시스템은 여러 개의 진동모드(vibration mode)를 가지는 다모드 시스템(multi-mode system)임에도 불구하고 많은 시스템에서는 한 개의 주진동모드(Primary Vibration Mode)를 제어함으로써 만족할 만한 진동제거 효과를 얻을 수 있다. 그렇지만 시스템의 성능에 영향을 미치는 진동모드가 여러 개일 경우 한 개의 주진동모드만 제어한다고 전체 시스템에서 만족할 만큼의 변위제거 효과를 얻을 수 없다. 따라서 다모드 시스템을 위해서는 다모드 입력성형기가 필요하게 되었으며, Singer and Singhose의 SI(Specified Insensitivity Shaper)[27]가 제시되었다.

▪ 비선형 시스템을 고려한 입력성형제어기

이론적인 지식을 기반으로 설계된 입력성형제기들은 실제 산업현장의 비선형 시스템에 대응하기가 어렵다. 따라서 실제 산업현장의 유연시스템의 비선형 구동기를 고려한 입력성형제어기의 개발이 많이 진행 되었다.[21-25] 특히 Lawrence[23]는 선형 입력성형제어기에 비선형 구동기의 영향으로 발생되는 가속도 및 감속도에 의한 시간지연을 고려하여 잔류변위저감 성능을 개선한 비선형 입력성형제어기를 개발 하였다. 산업 현장의 비선형 구동기의 동적특성을 고려한 입력성형제어기 설계에 필요한 적확한 변수가 필요하다.

▪ Adaptive 입력성형제어기

입력성형제어기법이 발표된 이후로 sliding-mode control 방법과 입력성형제어기술을 통합한 유연시스템 변위제어를 위한 adaptive 입력성형제어기[28-31]가 제시되었다. adaptive 입력성형제어기 설계에 가장 필요한 시스템 frequency를 추정하기 위해서 개발된 LIST(Learning Input Shaping Technique)제어 기술은 Park and Chang[29]에 개발이 되었으며, Cutforth and Pao[30]에 의해 개선되었다. 그러나 이러한 기술들은 선형시스템을 기반으로 설계가 되었으며, off-line 상태에서 근을 찾기 때문에 수렴되는 시간이 길다. 이 후 Tzes[31]에 의해 비선형 시스템 토크를 이

용해 실시간으로 시스템 frequency와 damping을 추정 할 수 있으나, 비선형 시스템을 선형화 시켜 positive input shaper를 사용함으로써 제어시간이 길어졌다.

지금까지 개발된 비선형 구동기의 동적 특성을 고려한 제어기들은 1st-order dynamic 특성만을 고려되었다. 실제 비선형 구동기는 inertia, friction, slip 등의 비선형적 요소로 인하여 2nd-order dynamic 형태의 비이상적인 속도 profile이 생성되므로 지금까지 개발된 제어기로는 대응 할 수가 없다. 따라서 2nd-order dynamic 특성을 갖는 실제 비선형 구동기에 대응 할 수 있는 제어기가 필요하다. 또한 실제 비선형 구동기의 동적특성을 2nd-order dynamic 특성을 갖는 parameters를 추정하여 비선형 구동기의 동적특성에 대응하는 제어기를 독립적으로 설계할 필요가 있다.

제 3 절 연구 목적 및 구성

본 논문의 최종목표는 비선형 구동기를 갖는 유연시스템의 잔류변위를 억제하기 위해 비선형 구동기의 동적특성을 고려한 적응입력성형제어기를 설계하고, 적용 한다. 이를 위해 먼저 실제 구동기의 비선형 동적 특성에 대해 연구할 필요가 있으며, 비선형 구동기의 동적특성에 대응 할 수 있는 제어기를 개발한다. 개발된 제어기를 실제 비선형 구동기의 동적특성을 갖는 변수를 추정하여 적응 할 수 있는 적응입력성형제어기 개발을 통해 실험 장치에 적용하여 잔류변위 저감성능을 검증한다.

제 2장 에서는 제어기 개발을 위한 시스템 모델링과 실험을 통해 개발된 제어기의 성능 검증을 위해 실험장치의 하드웨어 정보와 소프트웨어를 소개 한다. 제 3장에서는 실제 비선형 구동기의 동적특성에 대해 분석하고, 분석된 구동기의 비선형 동적특성에 대해 vector diagram approach를 활용하여 비선형 구동기의 동적특성을 고려한 입력성형제어기와 강인성이 추가된 Robust 입력성형제어기를 제시한다. 제시된 제어기들을 simulation을 통한 성능 분석과 실험 장치에 적용하여 실험적으로 검증한다. 제 4장 에서는 비선형 구동기의 동적특성을 갖는 변수를 실시간으로 추정할 수 있는 방법을 제시하고, 추정된 변수를 실시간으로 대응하여 비선형 구동기의 동적특성을 고려한 Adaptive input shaping control 제시한다. 제시된 Adaptive input shaping control를 실험 장치에 적용하여 실험적으로 검증한다. 제 5장에서는 논문의 결론과 향후연구계획을 나타냈다.

제 2 장 검증 모델

본 연구에서 개발된 입력성형제어기의 과도변위 제한 및 잔류변위 저감 성능을 실험적으로 검증하기 위해 Fig. 2-1 의 실험 장치를 개발하였다. MINI-CRANE은 Siemens PLC (programmable logic controller)로 구성하고, 이론 검증을 위해 시스템 구동을 위한 pendant와 실험 data의 입출력할 수 있게 프로그램을 개발하였다. 실험장치의 구동에는 절대 엔코더를 사용하는 3개의 servo motor를 사용했고 payload의 흔들림을 측정하기 위해 Siemens VS720x 계열의 intelligent vision sensor를 사용하였다.

제 1 절 Benchmark flexible system

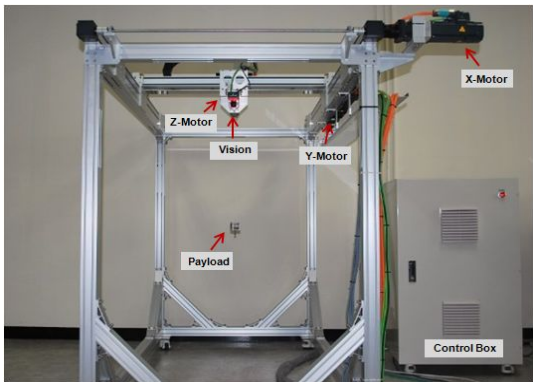


Fig. 2-1 Mini-crane for test-bed

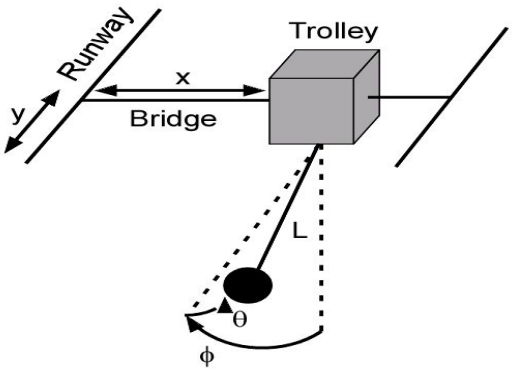


Fig. 2-2 Mini-crane modeling

입력성형제어기의 성능을 검증하기 위해서 실험장치 시스템의 최적의 조건으로 setting이 필요하고, 이러한 시스템의 동적특성에 맞는 linear dynamic equation이 필요하다.

▪ System model

첫 번째 Fig. 2-1은 실험에 사용될 실험장치 이며, Fig. 2-2은 실험장치의 형상을 자유도로 표현했다. trolley는 bridge에서 x 방향으로 움직이며, bridge만 runway에서 y 방향으로 움직인다. 그러므로 trolley는 직교좌표 상태 안에서 움직인다. 만일 줄 길이 L 이 고정되었다면, x, y 위치에 있는 trolly의 가속도는 payload의 회전각 ϕ 과 θ 과 관계가 있다.[21]

$$L\ddot{\phi} + L\dot{\theta}^2 cos(\phi)\sin(\phi) + g^*\sin(\phi)\cos(\theta) = \ddot{x}cos(\phi) + \ddot{y}sin(\phi)\sin(\theta) \quad (2.1)$$

$$L\ddot{\theta}cos(\phi) - 2L\dot{\phi}\dot{\theta}sin(\phi) + gsin(\phi) = -\ddot{y}cos(\theta)$$

식(2.1)을 비선형 상태 방정식 형태로 바꾸면

$$\dot{\vec{x}} = f(\vec{x}, \vec{u}), \quad (2.2)$$

여기에

$$\vec{x} = [\ \phi\ \dot{\phi}\ \theta\ \dot{\theta}\ x\ \dot{x}\ y\ \dot{y}\ ]^T, \quad (2.3)$$
$$\vec{u} = [\ddot{x}\ \ddot{y}]^T$$

식(2.2) 와 식(2.3)을 이용하여 상태변수 방정식으로 풀이 하면

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

$$\dot{x}_2 = -x_4^2 \cos(x_1)\sin(x_1) - \frac{g}{L} sin(x_1)\cos(x_3) + \frac{1}{L} u_1 \cos(x_1) + \frac{1}{L} u_2 \sin(x_1)\sin(x_3)$$

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

$$\dot{x}_4 = 2x_2 x_4 \tan(x_1) - \frac{g}{L} \frac{\sin(x_3)}{\cos(x_1)} - \frac{1}{L} u_2 \frac{\cos(x_3)}{\cos(x_1)}$$

$$\dot{x}_5 = x_6 \qquad \dot{x}_6 = u_1 \qquad \dot{x}_7 = x_8 \qquad \dot{x}_8 = u_2 \tag{2.4}$$

시스템의 선형 모델을 얻기 위해서는 $\vec{x} = \vec{u} = \vec{0}$ 을 대입하면

$$A = \left[\begin{array}{ccc} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \cdots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \vdots \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \cdots \cdots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{array} \right]_{\vec{x} = \vec{0}} \qquad B = \left[\begin{array}{ccc} \frac{\partial f_1}{\partial u_1} & \frac{\partial f_1}{\partial u_2} \cdots & \frac{\partial f_1}{\partial u_n} \\ \frac{\partial f_2}{\partial u_1} & \frac{\partial f_2}{\partial u_2} & \vdots \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial u_1} & \cdots \cdots & \frac{\partial f_n}{\partial u_n} \end{array} \right]_{\vec{u} = \vec{0}} \tag{2.5}$$

다음의 선형 상태 방정식인 식(2.6)을 얻는다.

$$\dot{\vec{x}} = A\vec{x} + B\vec{u} \tag{2.6}$$

여기에

$$A=\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -g/L & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -g/L & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \qquad B=\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1/L & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1/L \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{2.7}$$

payload의 위치는 식(2.8)과 같다.

$$x_{payload}= x- Lsin(\phi) \qquad y_{payload}= y+ Lcos(\phi)\sin(\theta) \tag{2.8}$$

제 2 절 Experimental Testbed

1. MINI-CRANE

실험장치는 효율적인 data처리를 위해 제어장치를 제작하고, 정확한 속도, 가/감속도 및 위치를 제어하고, absolute encoder를 이용하여 motor의 정보를 확인할 수 있는 3개의 servo motor를 이용해 Bridge (X-축), Trolley(Y-축), Hoisting (Z-축)으로 구성 하였다. 또한 실험장치의 안전을 고려하여 x-축 및 y-축의 양끝에 limit sensor를 설치했다.

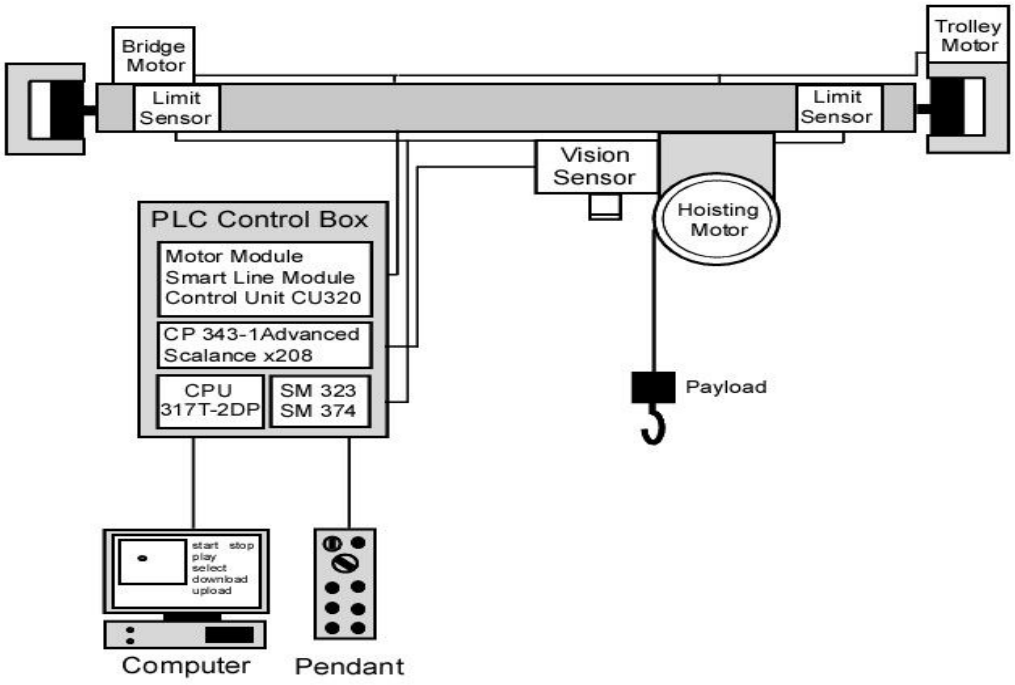


Fig. 2-3 A hardware configuration

실험분석을 목적으로 intelligent vision sensor(VS 720 Series)를 활용하였으며, payload의 변위를 측정하여 control box로 전송한다. 실험장치의 작동을 위해 산업현장의 pendant와 유사하게 제작 하였으며, 실험장치 작동을 위한 스위치 및 다양한 input shaping 제어기를 선택하는 스위치를 포함하여 14개의 버튼으로 구성 하였다. Table 2-1 는 실험장치의 payload 운전에 대한 사양을 나타낸다. 또한, 실험장치는 다양한 속도에서 실험이 가능하며 절대 엔코더의 사용으로 현재의 위치를 항상 저장하고 있어 위치 재설정이 불필요하다.

Table 2-1 Information of MINI-CRANE

내용	수치
x축 최대 행정	1300mm
y축 최대 행정	755mm
z축 최대 행정	1400mm
hook 무게	385g
최대 속도	1.5 m/s
encoder pulses per revolution	512pulses/revolution

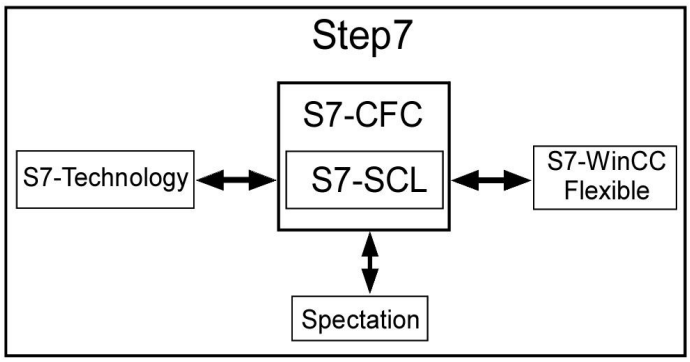


Fig. 2-4 A software connection

2. System program

실험장치의 작동과 실험을 위해 6개의 소프트웨어가 유기적으로 통합되어 시스템의 운전을 통제한다. step7은 전체 소프트웨어[34]를 관리하고, 실제 하드웨어의 정보를 가상으로 구성하여 전체 하드웨어를 제어한다. 지원하는 프로그래밍 언어는 FBD(Function Block Diagram), LAD(Ladder Diagram) 그리고 STL(Statement List)를 지원한다. 특화된 제어프로그래밍을 위해 소프트웨어 S7-SCL(Structured Control Language)를 사용하였다. SCL코드로 작성된 시스템 구동함수들의 data 입출력을 효율적으로 통합하기 위해 소프트웨어 S7-CFC(Continuous Function Chart)를 사용하였다. 그리고 실험장치의 특성을 고려하여 정확한 속도(mm/s), 가/감속도(mm/s^2) 및 jerk(mm/s^3)의 설정이 가능하고 여러 제어 기능을 지원하는 소프트웨어 S7-Technology를 사용하였다. 또한, 컴퓨터제어(computer control)을 위해 GUI(Graphic User Interface)는 소프트웨어 S7-WinCC flexible을 사용 하였다. 마지막으로 intelligent vision sensor의 사양을 설정하고 PLC와의 통신을 위한 소프트웨어 spectation을 사용하였다. Fig. 2-4에 소프트웨어 관계를 표시하였다.

시스템 프로그래밍은 실험장치가 입력성형제어기를 실행하고 실험 및 분석을 통한 검증이 용이하도록 구성되었다.

실험장치의 작동을 위한 입력은 3가지 방법으로 구성하였다. pendant에 의한 입력, GUI에 의한 입력과 가상의 시그널모듈을 이용한 입력으로 3가지 방법으로 실험장치가 작동하게 프로그래밍 하였다. 3개의 입력은 각자 할당된 어드레스에 의해 실험장치에 신호를 전달할 수 있다. 두 번째 입력은 소프트웨어 MATLAB를 활용하여 생성한 설계된 속도 및 위치로 작동되도록 GUI에서 실험장치에 실험정보를 업로드 하여 작동될 수 있게 프로그래밍 하였다. 마지막으로 세 번째는 실험장치가 homing 기능을 위해 절대엔코더의 정보를 활용한 프로그래밍 하였다.

시스템 프로그램의 실행순서는 payload이동을 위한 신호가 입력성형제어기로 전달되어 convolution과정을 수행하고, shaped input은 limit sensor의 신호를 지속적으로 monitoring하면서 각각의 servo-motor에 전달된다. 한편, shaped input을 실험하기 전에 S7-Technology 의 built-in function을 사용하여 모터의 속도, 가/감속도 및 jerk의 설정이 필요하다. 최종 과정으로 intelligent vision sensor에서 측정한

payload의 위치를 PLC로 실시간으로 전송하고, 실험분석을 위해 data저장 및 GUI에 표시한다. Fig. 2-5에 시스템의 프로그래밍을 flowchart로 나타냈다.

소프트웨어 S7-WinCC Flexible을 이용하여 실험 및 결과분석을 위한 GUI(Graphical User Interface)를 개발했다. 다중입력에 대한 실험을 위해 pendant에는 포함 되어 있지 않은 대각선 작동기능을 포함하였다. 또한, 실시간으로 trolley 위치를 비례 축소하여 나타내었으며, trolley위치 대해 offset변위를 intelligent vision sensor정보를 활용한 payload위치를 나타내었다. 여기서, camera lenses의 focal length에 따른 pixel의 상대적인 보정(calibration)을 수행하였다. 실험장치의 속도변경을 위해 고속 및 저속 선택 기능이 있다. 실험 및 분석을 위해 실험data의 다운 및 업로드 기능을 활용할 수 있다.

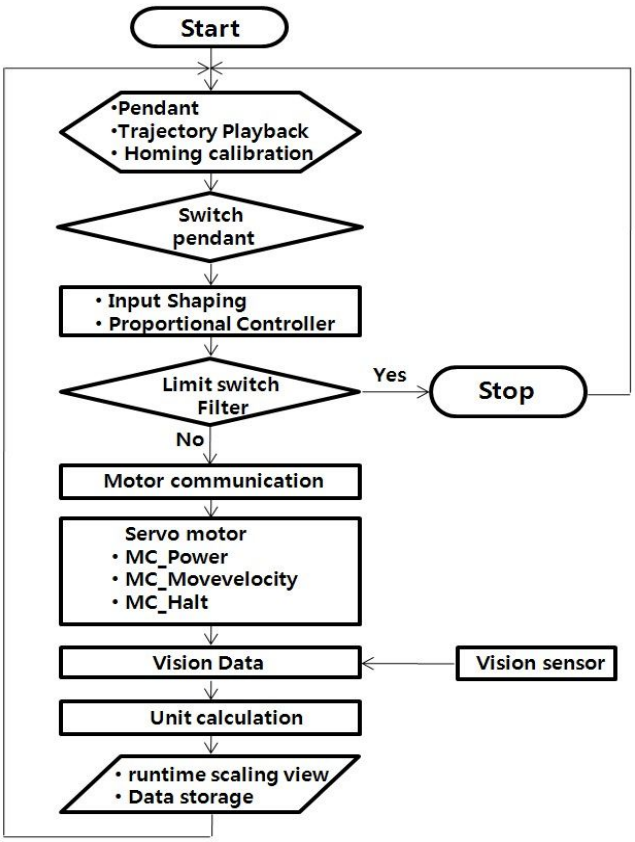


Fig. 2-5 A flowchart of system program

Fig. 2-6 of Upload process

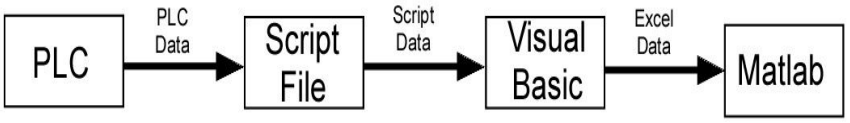


Fig. 2-7 Download process

Fig. 2-6는 업로드 과정으로 MATLAB을 활용하여 실험data를 생성하고 GUI script file로 변경한 후에 PLC-Technology CPU로 전송하여 실험data에 따라 속도와 위치가 제어된다. Fig. 2-7는 다운로드 과정으로 실험결과를 분석하기 위해 필요하며 실험 data는 GUI의 script file로 변경되어 script with visual basic language에 의해 microsoft excel formated-file로 변경된다. 실험data는 MATLAB을 활용한 결과분석을 수행하게 된다.

Spectation 화면으로 vision sensor를 setting 및 vision programming을 위한 소프트웨어이다. spectation의 실행 순서로는 지정한 검사 영역을 이진화(binary coding)하고 edge shape 검색한다. 다음으로 vision sensor의 pixel을 계산하고, 중심 pixel을 찾아서 PLC로 실시간으로 전송할 수 있게 프로그래밍 하였다.

Fig. 2-8는 payload의 실제 위치를 측정하기 위한 vision sensor calibration위해 Fig. 2-8 (a)와 같이 vision camera로 측정한 image는 vision camera에서 payload까지의 높이(L)에 따라 측정되는 pixel 수의 보정이 필요하다. lens에 따른 보상을 위해 실험에서 가장 많이 사용되는 높이(L) 500mm~1200mm의 구간에서 payload를 측정할 수 있는 focal length 4mm 와 6mm를 선정 하였다. Fig. 2-10 (b)는 vision이 인식하는 거리와 실제거리의 관계로 $a=\tan^{-1}B/A$ 로 표시되고 실제 거리 D=E/cos(a)로 구할 수 있다. 여기서 A: 카메라에서 payload까지의 높이, B: payload에서 카메라까지의 직선거리, C: vision에서 payload까지의 거리, D: 실제거리이고 E: vision이 인식하는 거리이다. Table 2-2는 카메라 focal length 6mm를 사용하였을 때, 카메라가 찾은 pixel의 수와 이때의 실제 거리를 실험한 결과이며,

Fig. 2-9은 pixel이 나타내는 degree이다. pixel에 따라 degree의 값을 curve fitting 하여, 함수 y=0.0708x+0.217를 구했다. Table 2-3는 focal length 4mm를 사용하였을 때, 카메라가 찾은 Pixel의 수와 이때의 실제 거리를 실험한 결과이며, Fig. 2-10는 pixel이 나타내는 degree이다. 다음은 pixel에 따라 degree값을 curve fitting 하여, 함수 y=0.1089x+0.0291를 얻었다.

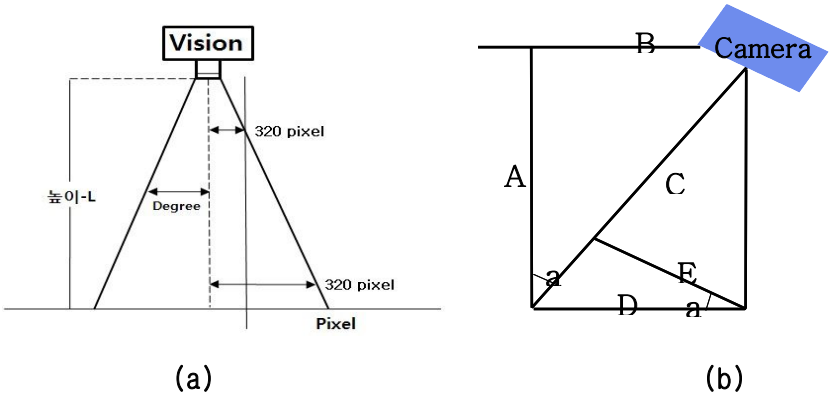


Fig. 2-8 Vision sensor calibration

Table 2-2 Experimental measurement(focal length: 6mm)

Degree(◦)	1	2	3	5	7
Pixel의 수	12	25	38	68	96
실제 거리(mm)	8.72	17.46	26.2	43.74	61.4

Table 2-3 Experimental measurement(focal length: 4mm)

Degree(◦)	1	2	3	5	7
Pixel의 수	9	19	27	44	65
실제 거리(mm)	8.72	17.46	26.2	43.74	61.4

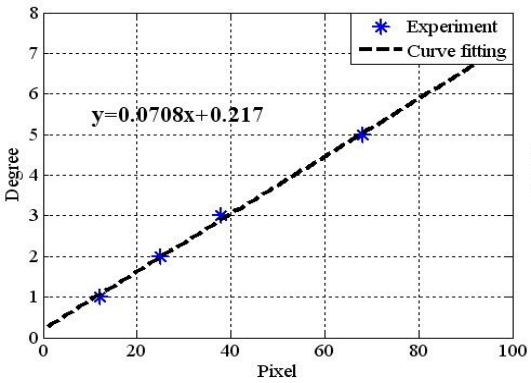


Fig. 2-9 Curve fitting for the focal length(6mm)

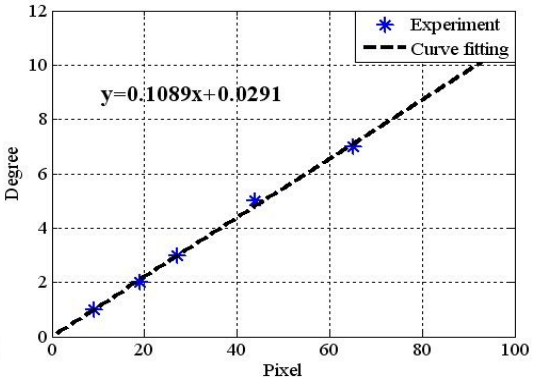


Fig. 2-10 Curve fitting for the focal length(4mm)

제 3 장 비선형 구동기에 대한 입력성형제어기

본 장에서는 위해 유연 시스템의 기동을 위한 구동기의 inertia, friction 등의 비선형적 요소로 인하여 비이상적인 속도 profile을 생성하여 입력성형 제어 기술의 변위저감 성능이 낮게 나타난다. 따라서 구동기의 비선형 동적 특성을 2nd-order response function[26]으로 근사화 시켜 vector diagram approach[APPENDIX A][19-20]을 활용한 입력성형제어기를 개발하고 잔류변위성능을 개선했다.

구동기의의 비선형 동적 특성에 대해 분석하고, 비선형 구동기의 동적 특성을 2nd-order response function으로 근사화를 통해 Vector diagram approach을 활용하여 NUMZV(Nonlinear Unit Magnitude Zero Vibration)를 개발했다. 제시된 NUMZV는 UMZV(Unit Magnitude Zero Vibration)와 제어성능을 비교했다. 또한 비선형 구동기의 동적특성에 대응하고 제어에 강인성을 추가한 NUMZVD (Nonlinear Unit Magnitude Zero Vibration Derivative)를 개발했다. numerical simulation with a single mode pendulum system과 experimental apparatus with a bridge crane에 의해 sensitivity 및 잔류변위를 평가 및 검증 한다.

제 1 절 소 개

유연시스템의 변위현상을 저감하기위해 1985년 처음으로 Smith가 Posicast방법을 개발하였다. posicast방법은 step input을 두 단계로 나누어 잔류변위를 제거한다. 그러나 시스템 매개변수의 modelling error에 대해 강인성이 미흡하여 실용성이 낮게 나타났다. modeling error에 대해 제어성능을 개선하기 위해 Singer와 Seering은 Smith의 입력성형제어기를 개발하였다. Fig.3-1처럼 입력성형제어기는 유연시스템의 연속된 임펄스가 시스템에 가해지면, 각각의 임펄스 응답이 서로 중첩되어 잔류변위가 서로 상쇄되는 원리를 이용하였다. 이렇게 얻어진 impulse sequence를 임의의 input과 convolution 하여 시스템 입력을 생성한다. Impulse의 수를 추가함으로서 modelling error에 대한 강인한 입력성형제어기가 설계된다.

numerical optimization을 활용하여 잔류변위를 제거하는 방법에 대해 많은 연구가 있었다. 최적화기법은 최적 해를 구하는데 계산이 복잡하고 가격함수는 총체적인 경로오차로 표시되어 진동모드가 특별한 경우에 반영되지 않는다. 따라서 잔류변위는 감소하여도 과도응답에서 변위가 발생될 수 있다.

Seering과 Meckl은 경사사인(ramped sinusiod)함수와 버사인(versine)함수를 이용하여 smooth input을 개발하였는데[8], 함수의 조합에서 유연시스템의 고유진동수 성분을 제거함으로서, 유연시스템의 가진력을 최소화하는 방법이다. 토크계산기법은 원하는 출력의 궤적을 정의하고 그 inverse model을 이용하여 출력과 동일한 입력을 구한다. 그러나 유연시스템의 modeling error에 대한 낮은 강인성 때문에 실용화에는 많은 문제를 야기 한다.

입력성형제어기법이 발표된 이후로 sliding-mode control 방법과 입력성형제어기술을 통합한 유연시스템 변위제어를 위한 adaptive control 방법 및 2개 모드를 갖는 유연시스템의 잔류변위 저감 및 에너지 절감형 input shaping controller가 개발되었다. 그리고 선형구동기의 동작속도 제한이 있는 유연시스템에 대한 과도진동변위를 제한하기 위한 제어기와 구동기의 2개의 속도영역을 활용한 제어기가 개발되었다. 또한 유연 시스템 구동기의 성능을 고려하여 On-off command 로 연료절약을 위한 입력성형제어기가 개발 되었다.

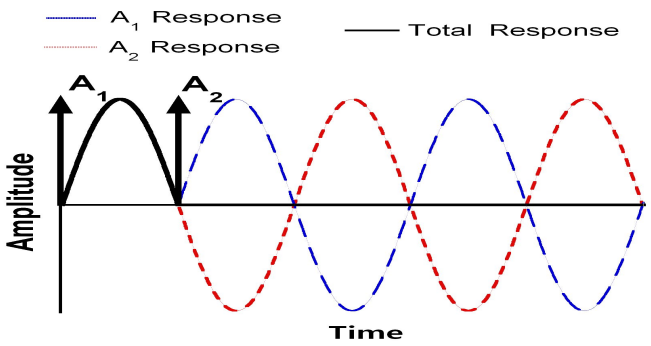


Fig. 3-1 Input shaping theory

최근에 유연시스템의 비선형 구동기를 고려한 입력성형제어기의 개발이 많이 진행되었다. 특히 Lawrence는 선형 입력성형제어기에 비선형 구동기의 영향으로 발생되는 가속도 및 감속도에 의한 시간지연을 고려하여 잔류변위저감 성능을 개선한 비선형 입력성형제어기를 개발 하였다. 그러나 산업 현장의 비선형 구동기의 동적 특성은 inertia, friction 등의 비선형적 요소로 인하여 2nd-order dynamic 형태의 비이상적인 속도 profile이 생성된다. 따라서 1st-order dynamic을 포함 할 수 있는 2nd-order dynamic을 고려한 제어기 설계가 필요하다.

본 장에서는 구동기의 비선형 동적 특성을 2nd-order response function으로 근사화 시켜 vector diagram approach을 활용한 입력성형제어기를 개발하고 잔류변위성능을 개선했다. 특히 Lawrence이 제시한, 비선형 구동기의 1st-order dynamic 특성을 고려한 UMZVc(Unit Magnitude Zero Vibration Compensated)에 대해 분석하고, 비선형 구동기의 2nd-order dynamic 특성을 고려한 NUMZV(Nonlinear Unit Magnitude Zero Vibration)를 개발한다.

제 2절에서는 일반적인 입력성형제어기를 소개한다. 제 3절에는 비선형 구동기의 동적특성에 대해 분석한다. 제 4절에는 비선형 구동기의 동적특성을 2nd-order response function으로 근사화 하여 vector diagram approach 활용하여 비선형 구동기의 동적특성을 고려한 입력성형제어기의 exact solution을 제시하고, start-stop motion을 포함한 비선형 구동기의 동적특성을 고려한 입력성형제어기를 실험적으로 검증한다. 제 5절에는 numerical optimization 방법과 curve fitting 방법을 이용하여 제어기의 2개의 임펄스를 추가하여 제어의 강인성을 갖는 NUMZVD

(Nonlinear Unit Magnitude Zero Vibration Derivative)을 제시하고, 실험적으로 제어기의 성능을 검증한다. 제 6절에는 결론으로 마무리한다.

제 2 절 입력성형제어기

입력성형제어기의 이론적 배경을 간략히 요약하고, 본 논문에 비교분석을 위해 활용된 제어기에 대해 나타내었다. 입력성형제어기는 second-order differential equation의 impulse response로부터 고유주파수(ω_n)와 감쇠비(ζ)의 함수로 표시되는 잔류변위 식(3.1)을 활용한다.

$$V(\omega_n,\zeta) = e^{-\zeta\omega_n t}\sqrt{C(\omega_n,\zeta)^2 + S(\omega_n,\zeta)^2} \tag{3.1}$$

여기서, $c(\omega_n,\zeta)$와 $s(\omega_n,\zeta)$는 식(3.2)와 식(3.3)으로 표시된다.

$$c(\omega_n,\zeta) = \sum_{i=1}^{n} A_i e^{\zeta\omega_n t_i}\cos(t_i\omega_n\sqrt{1-\zeta^2}) \tag{3.2}$$

$$s(\omega_n,\zeta) = \sum_{i=1}^{n} A_i e^{\zeta\omega_n t_i}\sin(t_i\omega_n\sqrt{1-\zeta^2}) \tag{3.3}$$

잔류변위를 제거하기 위해 식(3.2)와 식(3.3)이 0(zero)가 되고, 모든 A_i의 합이 1인 구속 조건과 함께 A_i(amplitude)와 t_i(impulse time)을 결정한다.

1. Negative 입력성형제어기

유연시스템의 잔류변위의 저감을 위해 입력성형제어기를 활용하는데, 입력성형제어기의 time delay 특성으로 제어종료시간이 증가한다. 또한 on-off type의 시스템을 갖는 산업 현장에서 적용하기 어렵다. 따라서 입력성형 제어 시간을 줄이고, on-off type의 시스템을 갖는 산업 현장에 적용하기 위해서 음의 입력을 포함한 입력성형제어기 UMZV(Unit Magnitude Zero Vibration)제어기가 제안 되었다. zero 잔류변위를 얻기 위한 조건을 만족하고 입력크기가 식(3.4)을 만족하는 조건을 이용하여 UMZV제어기의 입력의 크기와 시간을 구하면 식(3.5)으로 표현된다. initial command에 UMZV제어기 convolution 하면 Fig. 3-2과 같이 shaped command를 얻을 수 있다.

$$A_i = (-1)^i \tag{3.4}$$

$$\begin{bmatrix} A_i \\ t_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 1 \\ 0 & \frac{T}{6} & \frac{T}{3} \end{bmatrix} \tag{3.5}$$

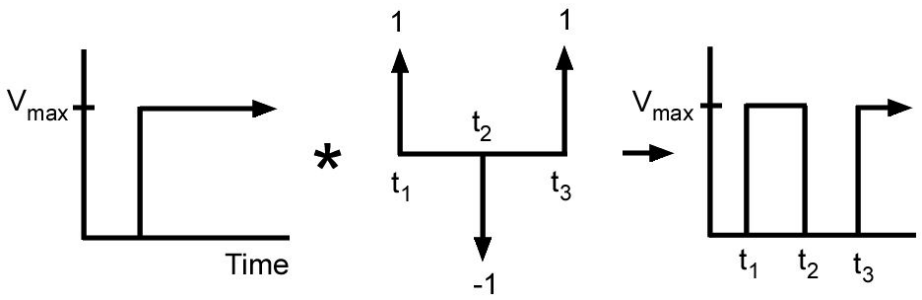


Fig. 3-2 UMZV shaper

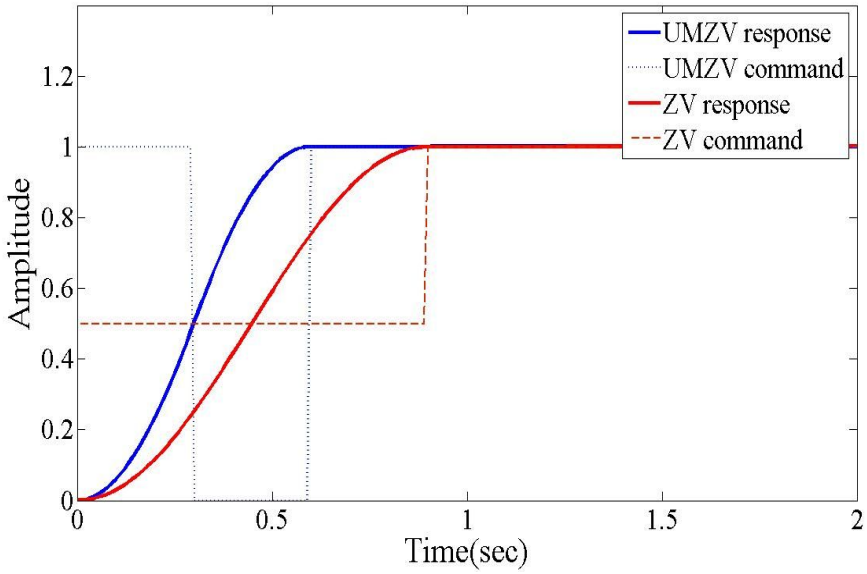


Fig. 3-3 Position response to ZV and UMZV shaper

Fig. 3-3는 입력성형제어기 ZV(Zero Vibration)[18]와 비교 했을 때 UMZV입력성형제어기가 정상상태에 도달하는 시간이 ZV보다 단축됨을 보인다.

2. Robust 입력성형제어기

입력성형제어기의 설계 시 사용된 주파수와 감쇠비가 실제 시스템의 주파수 및 감쇠비와 정확하게 일치 하지 않거나, 제어도중에 변화 하면 입력성형제어기의 잔류변위 저감의 높은 성능을 기대하기 어렵다. system modeling error에 강인한 제어기를 설계하기 위해 impulse의 수를 증가시킨 입력성형제어기가 개발되었다.[16-17] 잔류변위를 얻기 위한 식(3.1)에서 시스템주파수 변화에 강인한 입력성형제어기를 개발하기 위해 ω_n 로 미분하여 식(3.6)과 같이 나타냄으로써, 시스템주파수에 강인한 입력성형제어기를 설계할 수 있다.

$$0 = \frac{d}{d\omega_n} e^{-\zeta\omega_n t_n} \sqrt{[\sum_{i=1}^{n} A_i e^{\zeta\omega_n t_i} \cos(\omega_n \sqrt{1-\zeta^2} t_i)]^2 + [\sum_{i=1}^{n} A_i e^{\zeta\omega_n t_i} \sin(\omega_n \sqrt{1-\zeta^2} t_i)]^2} \quad (3.6)$$

식(3.6)의 괄호안의 두 항은 각각 0(zero) 가 돼야 하므로, 식(3.7)과 식(3.8)을 만족해야 한다.

$$\sum_{i=1}^{n} A_i t_i e^{-\zeta\omega_n (t_n - t_i)} \sin\left(t_i \omega_n \sqrt{1-\zeta^2}\right) = 0 \quad (3.7)$$

$$\sum_{i=1}^{n} A_i t_i e^{-\zeta\omega_n (t_n - t_i)} \cos\left(t_i \omega_n \sqrt{1-\zeta^2}\right) = 0 \quad (3.8)$$

impulse의 수가 증가할수록 입력성형제어기는 강인성이 증가하지만 정상상태 도달시간의 증가하게 된다. 그러므로 강인성과 응답속도를 trade-off하여 입력성형제어기를 설계한다.

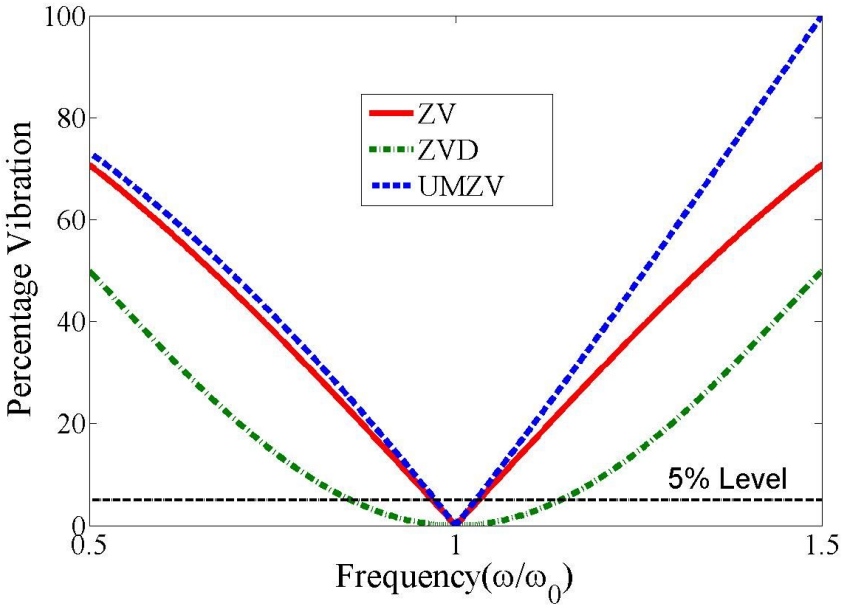


Fig. 3-4 Sensitivity curve

Fig. 3-4 는 ZV와 ZVD[18], UMZV 제어기의 강인성을 비교한 그림으로 x축은 실제 주파수로 normalization하였다. 실제 주파수와 이론 주파수의 값이 동일한 1을 기준하여 허용 잔류진동(residual vibration) 5% 으로 insensitivity를 정의 할 때, x축의 오차 범위가 넓은 ZVD제어기가 ZV, UMZV제어기보다 강인하다는 것을 확인 할 수 있다.

제 3 절 비선형 구동기의 동적 특성

2nd-order dynamic 시스템을 갖는 비선형 구동기에 일반적인 입력성형제어기를 통과 하면서 비선형 속도 profile을 갖게 된다. Fig.3-5 그림처럼 $V_s(t)$는 nonlinear actuator에 의해 $V_t(t)$로 변화된다. 이렇게 변화된 $V_t(t)$에 의해 잔류변위 제어 성능을 저하시킨다. Fig.3-6는 2nd-order dynamic 시스템을 갖는 비선형 구동기의 동적특성을 2nd-order response function으로 근사화 시켜 nonlinear velocity profile에 대해 그림으로 나타냈다. 2nd-order response function의 변수는 ω_1, ω_2, ζ_1, ζ_2 표현되며 ω_1, ω_2는 함수의 기울기에 영향을 미치는 변수이며, ζ_1, ζ_2는 Fig.3-6처럼 response의 모양을 결정한다.

$$\text{if } \omega_1 = \omega_2 \; then \; \zeta_1 \neq \zeta_2 \tag{3.9}$$

$$\text{if } \zeta_1 = \zeta_2 \; then \; \omega_1 \neq \omega_2 \tag{3.10}$$

$$else \; \omega_1 \neq \omega_2 \text{ and } \zeta_1 \neq \zeta_2 \tag{3.11}$$

2nd-order dynamic 시스템을 갖는 비선형 구동기의 동적특성에 대해 연구하기 위해서는 식(3.9), 식(3.10), 식(3.11) 조건에 만족해야 한다. 하지만 식(3.12)의 조건에 만족했을 경우는 비선형 속도 프로파일을 갖으나, 선형 속도프로파일을 갖는 제어기의 성능과 동일한 결과를 갖는다.

$$\omega_1 = \omega_2 \text{ and } \zeta_1 = \zeta_2 \tag{3.12}$$

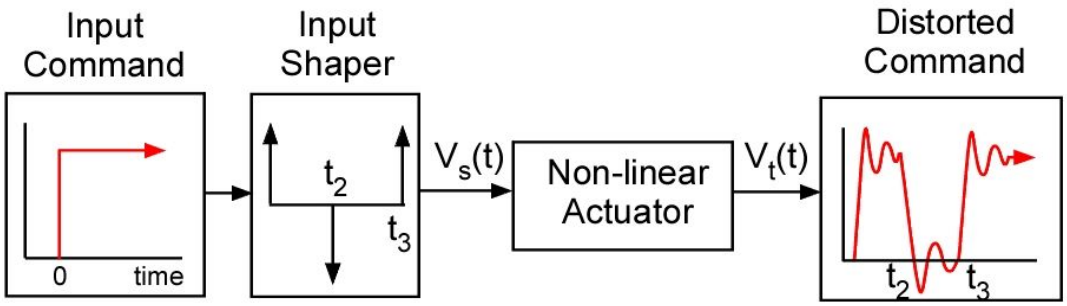


Fig. 3-5 Input shaping process with nonlinear actuator

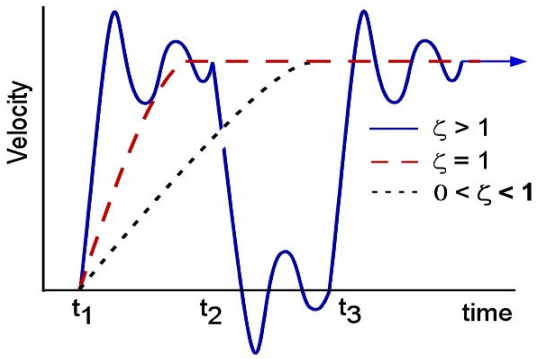


Fig. 3-6 Velocity profile by nonlinear actuator

제 4 절 NUMZV controller

1. NUMZV 제어기 개발

일반적으로 입력성형제어기는 linear system에 의해 구현되어 유연시스템의 잔류변위를 저감하도록 설계된다. 그러나 Fig.3-5과 같이 input shaper를 통과한 속도 $V_s(t)$는 non-linear actuator 에 의해 비선형 속도 $V_t(t)$로 변화된다. 변화된 속도에 의해 입력성형제어기의 변위저감 성능이 낮게 나타난다.

Fig. 3-6는 NUMZV의 선형속도가 non-linear actuator의해 Overshoot, Td(time delay), Tr(rising time) 의해 비선형속도로 나타남을 보이고 있다. Fig.3-7는 비선형 구동기의 동적특성을 고려한 입력성형제어기(NUMZV)를 개발 과정을 도식적으로 나타냈다. 산업 현장의 다양한 구동기의 비선형 동적 특성을 2nd-order response function으로 근사화를 통해 laplace transform과 vector diagram approach[APPENDIX A]를 활용 exact solution, start-stop close-form solution 제시 한다.

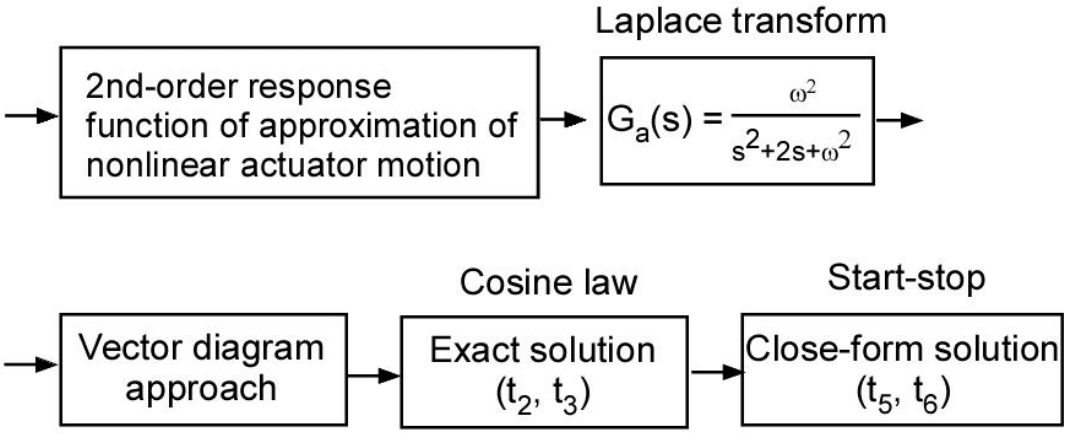


Fig. 3-7 Development process to NUMZV

비선형 구동기의 동적특성을 수식으로 근사화 시켜 전달함수로 나타내면 식(3.13)과 같다.

$$G_a(s) = \frac{\omega^2}{s^2 + 2\zeta\omega s + \omega^2} \tag{3.13}$$

식(3.13)을 ζ에 대하여 Fig.3-7와 같은 y(t) 시간응답 함수로 각각 근사화 하면 식(3.14), 식(3.15), 식(3.16)과 같다.

1). if $\zeta > 1$ then

$$y(t) = 1 - e^{-\omega t}\cosh(\omega\sqrt{\zeta^2 - 1})t - \frac{\zeta}{\sqrt{\zeta^2 - 1}} e^{-\omega t}\sinh(\omega\sqrt{\zeta^2 - 1})t \tag{3.14}$$

2). if $\zeta = 1$ then

$$y(t) = 1 - e^{-\omega t} - \omega t e^{-\omega t} \tag{3.15}$$

3). if $0 < \zeta < 1$ then

$$y(t) = 1 - \frac{\zeta e^{\zeta\omega t}}{\sqrt{1 - \zeta^2}} sin\omega t - e^{-\zeta\omega t}\cos\omega t \tag{3.16}$$

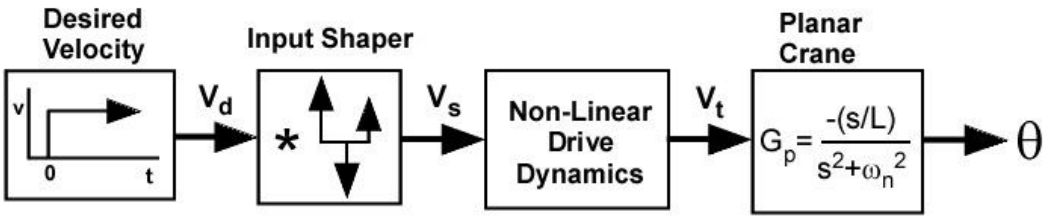


Fig. 3-8 Control input process to planar crane

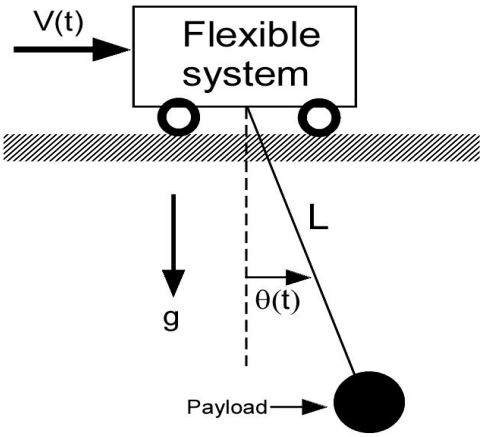


Fig. 3-9 A pendulum system

Fig. 3-8은 시스템의 블록선도이며, Fig. 3-9의 pendulum 시스템에 대한 전달함수는 다음과 같이 표시된다. 일반적인 steady-state response Θ_{ss} 는 식 (3.17)과 같이 나타난다. 여기에서 magnitude와 phase는 식 (3.18)으로 표시된다.

$$\theta_{ss}(t) = A\sin(\omega t + \varnothing) \tag{3.17}$$

$$A = \left|\sum \overrightarrow{v_i}\right| \qquad \varnothing = \angle\left|\sum \overrightarrow{v_i}\right| \tag{3.18}$$

일반적인 pendulum의 응답은 식(3.19)과 같다. 응답 Θ(s)는 식 (3.20)와 같이 시스템과 sine input으로 표현된다. s=jω 로 바꾸어 식 (3.13)의 steady state response으로 나타내면 식 (3.21)로 나타낼 수 있다.

$$\theta(s) = G_p(s).v_t(s) = -\frac{\frac{s}{L}}{s^2+\omega^2}v_t(s) \tag{3.19}$$

$$\theta(s) = -\frac{v_t(s).s}{L}.\frac{1}{s^2+\omega^2} \tag{3.20}$$

$$\theta_{ss}(t) = \frac{|v_t(j\omega)|}{L} sin(\omega t - \frac{\pi}{2} + \angle v_t(j\omega)) \tag{3.21}$$

벡터의 amplitude 와 phase로 나타내면, 식(3.22)으로 나타난다.

$$\vec{v} = \frac{|v_t(j\omega)|}{L} \angle (-\frac{\pi}{2} + \angle v_t(j\omega)) \tag{3.22}$$

Fig. 3-10는 UMZV제어기의 이론적인 속도명령어와 구동기의 비선형에 의해 변형된 실제 속도명령어 이다. 여기서, 입력 v(t)는 식(3.14),식(3.15),식(3.16)의 근사화된 함수를 이용하여 속도를 얻는다. Fig. 3-10은 Fig. 3-11의 그림처럼 부분적으로 나누어진 속도 프로파일을 합함으로써 비선형 속도프로파일로 나타 낼 수 있다. 전체 속도명령어에 대한 함수는 식(3.23)으로 나타낼 수 있다.

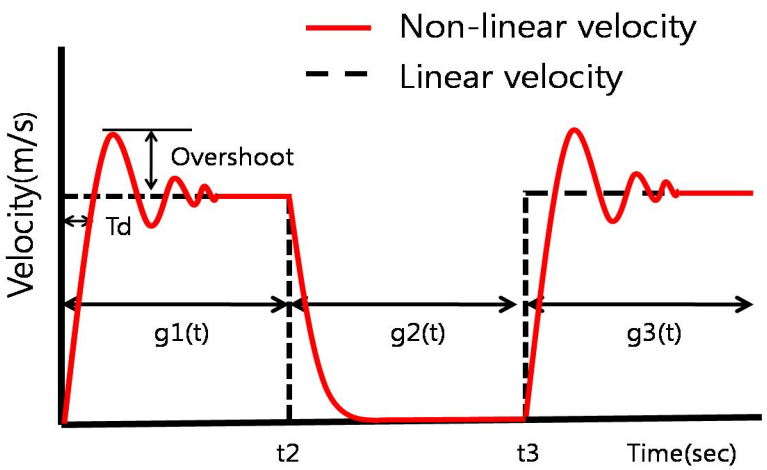


Fig. 3-10 Desired and actual velocity profile of NUMZV shaper

$$v_t(t) = \sum_{i=1}^{3} g_i(t) * \delta(t - t_i) \tag{3.23}$$

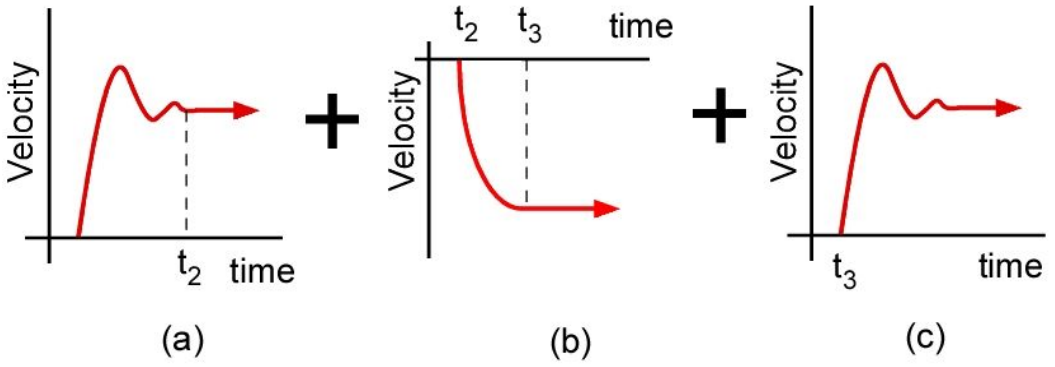


Fig. 3-11 Nonlinear velocity command for analysis

식 (3.23)을 부분 적으로 나타내면 Fig. 3-11의 (a) = 식(3.24), (b) = (3.25)와 (c) = (3.26)과 같다.

$$g_1(t) = (1 - \frac{e^{-\zeta_1 \omega_1 t}}{\sqrt{1-\zeta_1^2}} sin(\omega_1 \sqrt{1-\zeta_1^2} + \tan^{-1} \frac{\sqrt{1-\zeta_1^2}}{\zeta_1}) \tag{3.24}$$

$$g_2(t) = 1 - e^{-\omega_2 t} \cosh(\omega_2 \sqrt{\zeta_2^2 - 1})t - \frac{\zeta_2}{\sqrt{\zeta_2^2 - 1}} e^{-\omega_2 t} \sinh(\omega_2 \sqrt{\zeta_2^2 - 1})t \tag{3.25}$$

$$g_3(t) = (1 - \frac{e^{-\zeta_1 \omega_1 t}}{\sqrt{1-\zeta_1^2}} sin(\omega_1 \sqrt{1-\zeta_1^2} + \tan^{-1} \frac{\sqrt{1-\zeta_1^2}}{\zeta_1}) \tag{3.26}$$

식(3.24), 식(3.25), 식(3.26)을 각각 Laplace transform 하여 식(3.27) 와 같이 벡터의 amplitude와 phase로 나타낸다. $s=(jw_n)$

$$\vec{v}=\frac{|v_t(jw_n)|}{L}\angle(-\frac{\Pi}{2}+\angle v_t(jw_n)) \tag{3.27}$$

$$\angle v_t(jw_n)=\tan^{-1}\frac{\text{허수부}}{\text{실수부}}$$

$$\overrightarrow{v_1}=\frac{v_{\max}\cdot\omega_1\sqrt{4\zeta_1^2\omega_1^4w_n^2+\omega_1^6-2\omega_1^4w_n^2+w_n^6\omega_1^4}}{L\cdot w_n(4\zeta_1^2\omega_1^2w_n^2+\omega_1^4-2\omega_1^2w_n^2+w_n^4)}\angle[\tan^{-1}(\frac{-(\omega_1^2-w_n^2)}{-2\zeta_1\omega_1w_n})-\frac{3\pi}{2}] \tag{3.28}$$

$$\overrightarrow{v_2}=\frac{-v_{\max}\cdot\omega_2\sqrt{4\zeta_2^2\omega_2^4w_n^2+\omega_2^6-2\omega_2^4w_n^2+w_n^6\omega_2^4}}{L\cdot w_n(4\zeta_2^2\omega_2^2w_n^2+\omega_2^4-2\omega_2^2w_n^2+w_n^4)}\angle[\tan^{-1}(\frac{(\omega_2^2-w_n^2)}{-2\zeta_2\omega_2w_n})-\frac{\pi}{2}] \tag{3.29}$$

$$\overrightarrow{v_3}=\frac{v_{\max}\cdot\omega_1\sqrt{4\zeta_1^2\omega_1^4w_n^2+\omega_1^6-2\omega_1^4w_n^2+w_n^6\omega_1^4}}{L\cdot w_n(4\zeta_1^2\omega_1^2w_n^2+\omega_1^4-2\omega_1^2w_n^2+w_n^4)}\angle[\tan^{-1}(\frac{-(\omega_1^2-w_n^2)}{-2\zeta_1\omega_1w_n})-\frac{3\pi}{2}] \tag{3.30}$$

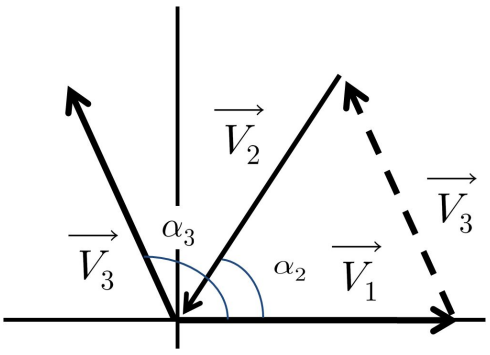


Fig. 3-12 Vector diagram

간단하게 나타내기 위해 $\overrightarrow{v_1}$의 amplitude로 3개의 벡터의 amplitude를 나눠주고, 3개의 벡터의 angle에서 $\overrightarrow{v_1}$의 angle로 빼주면 식(3.31), (3.32), (3.33)로 표현된다.

(t_1 = 0)

$$\overrightarrow{v_1} = 1 \angle [w_n t_1] \tag{3.31}$$

$$\overrightarrow{v_2} = \frac{\frac{v_{\max} \cdot \omega_2 \sqrt{4\zeta_2^2\omega_2^4 w_n^2 + \omega_2^6 - 2\omega_2^4 w_n^2 + w_n^4\omega_2^2}}{L \cdot w_n(4\zeta_2^2\omega_2^2 w_n^2 + \omega_2^4 - 2\omega_2^2 w_n^2 + w_n^4)}}{\frac{v_{\max} \cdot \omega_1 \sqrt{4\zeta_1^2\omega_1^4 w_n^2 + \omega_1^6 - 2\omega_1^4 w_n^2 + w_n^4\omega_1^2}}{L \cdot w_n(4\zeta_1^2\omega_1^2 w_n^2 + \omega_1^4 - 2\omega_1^2 w_n^2 + w_n^4)}} \tag{3.32}$$

$$\angle [\tan^{-1}\frac{\omega_2^2 - w_n^2}{2\zeta_2\omega_2 w_n} - \tan^{-1}\frac{\omega_1^2 - w_n^2}{2\zeta_1\omega_1 w_n} - \frac{\pi}{2} + \frac{3\pi}{2}]$$

$$\overrightarrow{v_3} = 1 \angle [w_n t_3] \tag{3.33}$$

Fig. 3-12의 Vector diagram approach를 활용하여 NUMZV의 제어 시간을 결정할 수 있다. $a_2 = \angle \overrightarrow{v_2}$ 와 $a_3 = \angle \overrightarrow{v_3}$ 같다. 여기에 cosines law를 이용하면 식(3.34), 식(3.35)을 얻는다.

$$\text{cosines law} : \ |\overrightarrow{v_3}|^2 = |\overrightarrow{v_1}|^2 + |\overrightarrow{v_2}|^2 - 2|\overrightarrow{v_1}|^2 * |\overrightarrow{v_2}|^2 \cos\alpha_2$$

$$t_2 = \frac{1}{w_n}(\tan^{-1}\frac{\omega_2^2 - w_n^2}{2\zeta_2\omega_2 w_n} - \tan^{-1}\frac{\omega_1^2 - w_n^2}{2\zeta_1\omega_1 w_n} + \cos^{-1}(\frac{\beta_1}{2})) + nT \tag{3.34}$$

$$t_3 = \frac{1}{w_n}(\cos^{-1}(\frac{\beta_1^2}{2} - 1)) + mT \tag{3.35}$$

$$\beta_1 = \frac{\dfrac{\omega_2\sqrt{4\zeta_2^2\omega_2^4 w_n^2 + \omega_2^6 - 2\omega_2^4 w_n^2 + w_n^4\omega_2^2}}{(4\zeta_2^2\omega_2^2 w_n^2 + \omega_2^4 - 2\omega_2^2 w_n^2 + w_n^4)}}{\dfrac{\omega_1\sqrt{4\zeta_1^2\omega_1^4 w_n^2 + \omega_1^6 - 2\omega_1^4 w_n^2 + w_n^4\omega_1^2}}{(4\zeta_1^2\omega_1^2 w_n^2 + \omega_1^4 - 2\omega_1^2 w_n^2 + w_n^4)}}$$

Fig.3-13과 Fig.3-14는 식(3.34), 식(3.35)에 포함된 β_1의 크기를 나타냈다. Fig.3-13은 ζ_1=ζ_2=0.8로 설정하고, ω_1과 ω_2의 크기에 대해 β_1의 크기를 나타냈으며, Fig.3-14은 ω_1=ω_2=50으로 설정하고, ζ_1과 ζ_2의 크기에 대해 β_1의 크기를 나타냈다. β_1은 ζ_1, ζ_2, ω_1, ω_2의 변수들의 차이가 작을수록 β_1의 크기는 1에 가깝게 되어 closed vector diagram으로 나타난다.

그러므로 실수의 t_2, t_3를 얻기 위해서는 $\cos^{-1}$ term에 β_1는 반드시 $-2 \le \beta_1 \le 2$ 사이에 있어야 하며, ω_1 과 ω_2, ζ_1 과 ζ_2의 차이가 많이 나지 않아야 한다. 실제 비선형 구동기를 갖는 시스템일지라도 ω_1 과 ω_2, ζ_1 과 ζ_2의 차이는 많이 나지 않으며, ζ_1 와 ζ_2은 0.3 이하의 값은 실제 구동기에서 발생하기 어려워 제어기 성능분석에 적합하지 않는다.

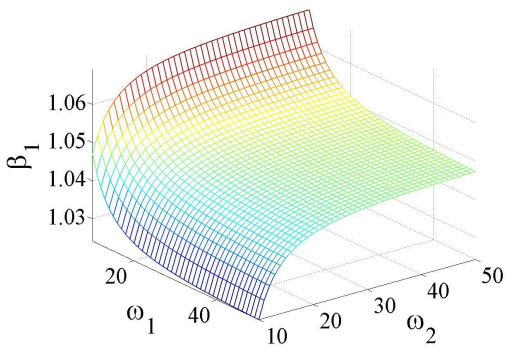


Fig. 3-13 Amplitude of β_1 for analysis(ω_1 and ω_2)

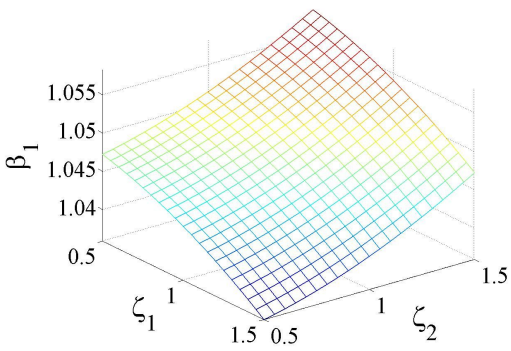


Fig. 3-14 Amplitude of β_1 for analysis(ζ_1 and ζ_2)

식(3.37), 식(3.38), 식(3.39)은 시간에 대한 속도 값을 나타내는 식으로 NUMZV제어기를 개발하는데 사용된다. 제어기의 입력시간 t_2와 t_3에서 n 과 m 은 2nd-order response function의 변수인 ω_1, ω_2, ζ_1, ζ_2 에 의해 나타나는 비선형의 특성을 보상하기 위한 값으로 입력성형제어의 다음 시간 전에 속도가 최대 및 최소 속도의 80%이상 근접해야 한다. 항상 n $\leq$ m 과 $t_2 \leq t_3$를 만족한다. Fig.3-12은 식(3.37), (3.38), (3.39)을 조건으로 식(3.40),식(3.41)을 만족 하는 n, m의 영역을 표시 했다. 식(3.40)는 일반적인 shaped command의 형성하기 위해서 비선형 속도가 정상상태 도달시간의 80%에 도달해야 한다. 제어기의 t_2, t_3의 실수값을 얻기 위해서는 식(3.41)을 만족해야한다. Fig. 3-15의 (a)는 ζ_1= ζ_2 =0.5 로 고정시키고 조건식을 이용했으며, Fig. 3-15의 (b)는 ζ_1= ζ_2 =0.8 로 고정시키고 조건식을 이용하여 n, m의 영역을 표시했다. Fig. 3-15의 (c)는 ζ_1= ζ_2 =1 로 고정시키고 조건식을 이용했으며, Fig. 3-15의 (d)는 ζ_1= ζ_2 =1.5 로 고정시키고 조건식을 이용하여 n, m의 영역을 표시했다. 여기서 V_h는 최대 비선형 속도이고, V_l은 최소 비선형 속도를 나타내고 있으며, V_{sh}는 ω_1, ω_2, ζ_1, ζ_2이 포함된 shaped command 속도를 나타낸다.

If $\zeta > 1$ then
$$V_{sh}(t) = V_{\max,\min}(1 - e^{-\omega t}\cosh(\omega\sqrt{\zeta^2-1})t - \frac{\zeta}{\sqrt{\zeta^2-1}}e^{-\omega t}\sinh(\omega\sqrt{\zeta^2-1})t) \quad (3.37)$$

If $\zeta = 1$ then
$$V_{sh}(t) = V_{\max,\min}(1 - e^{-\omega t} - \omega t e^{-\omega t}) \quad (3.38)$$

If $0 < \zeta < 1$ then
$$V_{sh}(t) = V_{\max,\min}(1 - \frac{\zeta e^{\zeta\omega t}}{\sqrt{1-\zeta^2}}sin\omega t - e^{-\zeta\omega t}\cos\omega t) \quad (3.39)$$

$$\frac{V_h - V_l}{V_{sh}} < 20\% \quad (3.40)$$

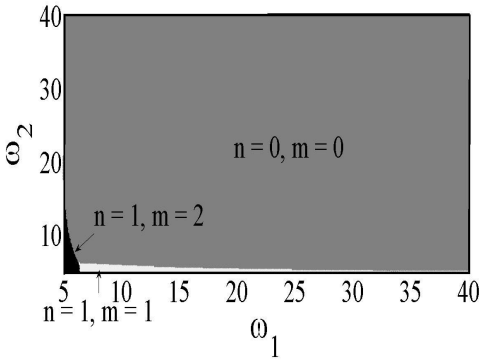
$$2 \cdot \omega_n < \omega_1 \text{and} \omega_2 \quad (3.41)$$

그리고 NUMZV를 활용한 유연시스템의 stop motion을 갖춘 NUMZV2 제어기의 나머지 switching times은 start motion의 과정과 유사하다. stop motion의 시작 시간 $t_4 = t_p$(pulse duration)으로 나타나며, t_5와 t_6는 식(3.42) 과 식(3.43)의 일반화된 식으로 표시된다.

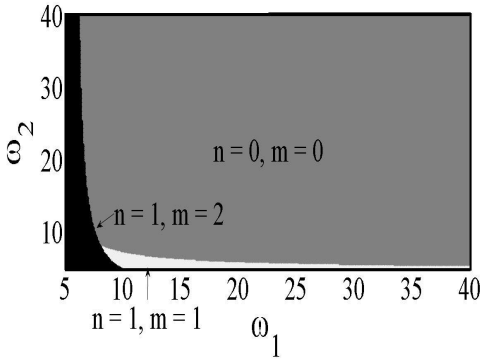
$$t_5 = t_4 + \frac{1}{w_n}(\tan^{-1}\frac{\omega_1^2 - w_n^2}{2\zeta_1\omega_1 w_n} - \tan^{-1}\frac{\omega_2^2 - w_n^2}{2\zeta_2\omega_2 w_n} + \cos^{-1}(\frac{\beta_2}{2})) + nT \quad (3.42)$$

$$t_6 = t_4 + \frac{1}{w_n}(\cos^{-1}(\frac{\beta_2^2}{2} - 1)) + mT \quad (3.43)$$

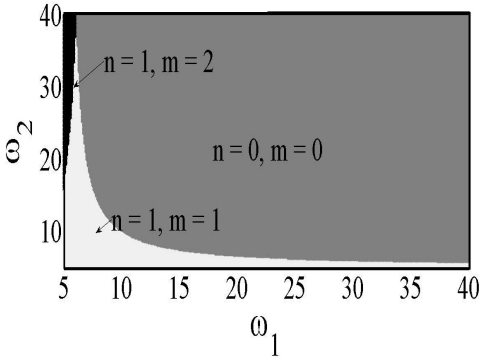
$$\beta_2 = \frac{\omega_1\sqrt{4\zeta_1^2\omega_1^4 w_n^2 + \omega_1^6 - 2\omega_1^4 w_n^2 + w_n^4\omega_1^2}}{(4\zeta_1^2\omega_1^2 w_n^2 + \omega_1^4 - 2\omega_1^2 w_n^2 + w_n^4)} \frac{\omega_2\sqrt{4\zeta_2^2\omega_2^4 w_n^2 + \omega_2^6 - 2\omega_2^4 w_n^2 + w_n^4\omega_2^2}}{(4\zeta_2^2\omega_2^2 w_n^2 + \omega_2^4 - 2\omega_2^2 w_n^2 + w_n^4)}$$



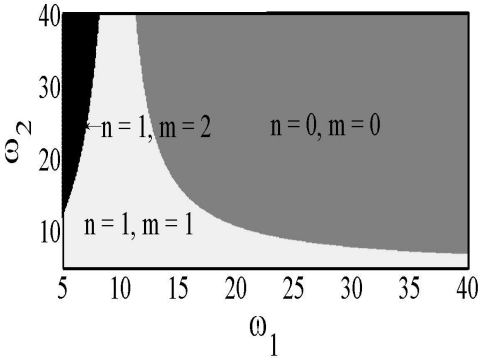
(a) $\zeta_1 = \zeta_2 = 0.5$



(b) $\zeta_1 = \zeta_2 = 0.8$



(c) $\zeta_1 = \zeta_2 = 1$



(d) $\zeta_1 = \zeta_2 = 1.5$

Fig. 3-15 Range of n and m of NUMZV shaper

2. NUMZV 제어기 평가

System natural frequency(ω_n)에 대한 NUMZV의 impulse 시간에 대해 MATLAB 프로그램[33]을 이용하여 Fig.3-16로 표현 했다. simulation에 필요한 변수 설정은 ω_1 = 20, ω_2 = 50, ζ_1 = 0.8, ζ_2 = 1.5, L = 0.8(m), t_p = 3(s)로 설정했다. t_5와 t_6는 t_2, t_3 및 t_p에 의해 결정된다. ω_n값이 클수록 제어 시간이 감소한다. NUMZV의 impulse time은 식(3.41)을 만족 했을 때 얻을 수 있다.

개발된 NUMZV 제어기 성능을 평가하기 위해 tp, ω_1, ζ_1에 대하여 잔류변위를 평가 했으며, a benchmark pendulum system with single mode를 사용했다.

simulation에 사용된 2nd-order response function으로 표시된 식(3.15), 식(3.16)을 사용했고, UMZV와 NUMZV를 비교하여 제어성능을 평가했다.

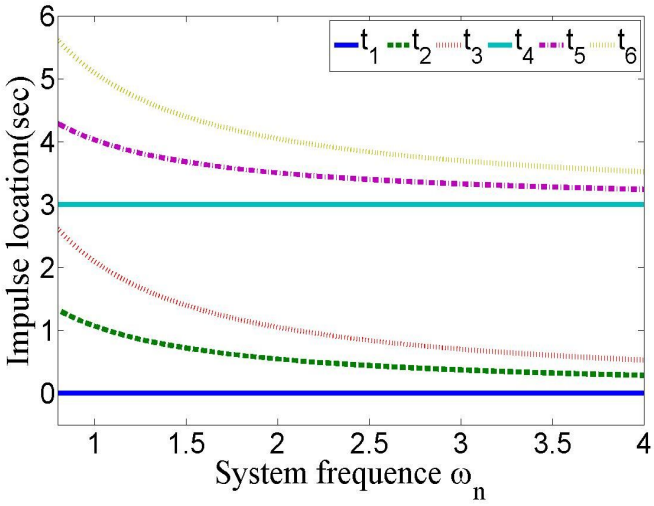


Fig. 3-16 NUMZV shaper to ω_n

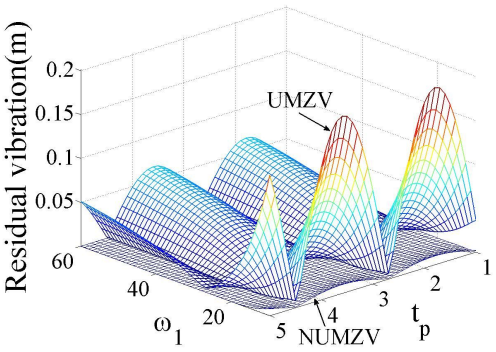


Fig. 3-17 Residual vibration comparison ω_1 and t_p

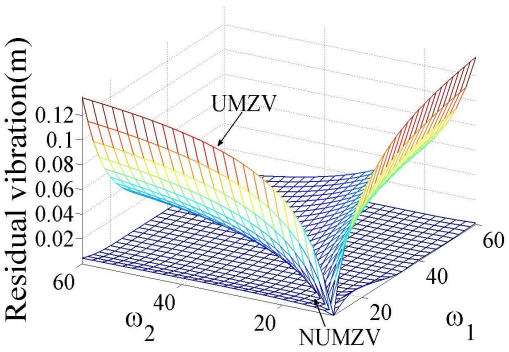


Fig. 3-18 Residual vibration comparison ω_1 and ω_2

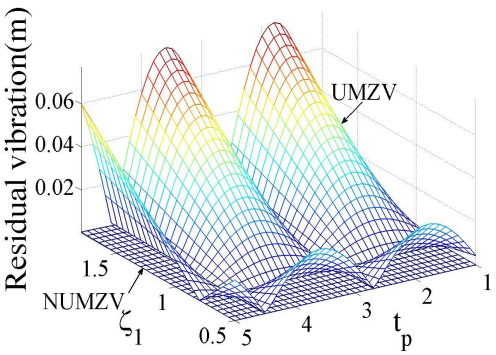


Fig. 3-19 Residual vibration comparison ζ_1 and t_p

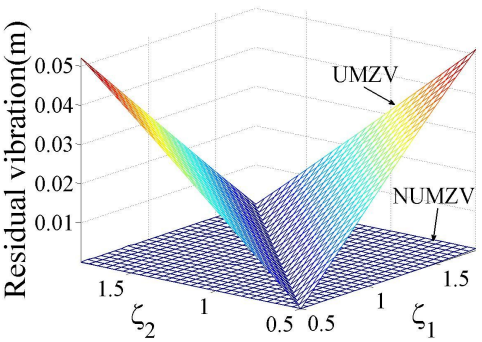


Fig. 3-20 Residual vibration comparison ζ_1 and ζ_2

Fig.3-17은 비선형 구동기의 동적 특성을 수식으로 근사화한 수식의 ω_1와 start-stop motion에 필요한 pulse duration(tp)의한 잔류변위 평가를 UMZV와 비교하여 simulation 했다. ω_1은 식(3.41)에 만족하고, ω_1이 10 보다 작을 경우에는 shaped command가 정상적인 형태를 갖추기 못해 잔류변위가 0.5cm 이상의 범위에 있지만, UMZV와 비교 했을 때 최대 75% 개선 효과가 있다.

Fig.3-18은 근사화한 수식의 $\zeta_1 = \zeta_2 = 0.8$으로 설정하고, ω_1와 ω_2의한 잔류변위의 성능을 평가한다. 구동기의 동적 특성을 고려한 NUMZV는 식(3.41)을 만족했을 때, ω_1와 ω_2의 차이 의한 잔류변위의 영향에 큰 변수가 되지 않으나, 구동기의

동적 특성을 고려하지 않은 UMZV는 ω_1와 ω_2의 차이에 따라 변위저감성능이 낮게 나타난다.

Fig.3-19는 근사화한 수식의 ζ_1와 t_p의 대한 잔류변위의 성능을 보인다. 구동기의 동적 특성을 고려한 NUMZV는 t_p의 대한 잔류변위의 영향에 큰 변수가 되지 않으나, 구동기의 동적 특성을 고려하지 않은 UMZV는 t_p에 따라 변위저감성능이 낮게 나타난다. ζ_1의 영향은 Fig.3-6에 나타난 그림처럼 응답시간(setting time)에 영향을 준다. 따라서 ζ_1가 0.3이하면 응답시간이 길어져서 잔류변위 저감의 효과가 작다. ζ_2 = 0.8, ω_2 = 50으로 설정했다.

Fig.3-20는 ζ_1와 ζ_2의 대해 NUMZV의 잔류변위 효과를 분석했다. ω_1 and ω_2 = 20으로 고정 하였으며, UMZV제어기와 비교 분석했다. NUMZV는 ω_n이 3.5Hz 일 때 전체적으로 0.05cm 이하에 잔류변위 크기가 나타난다. 또한 ζ_1와 ζ_2 차이가 많이 날수록 UMZV제어기는 ω_n이 3.5Hz 일 때 5cm이상의 잔류변위크기가 나타나 NUMZV는 UMZV에 비해 ζ_1와 ζ_2 차이에 의한 잔류변위 저감 성능이 개선됨을 보인다.

3. NUMZV 제어기 실험적 검증

구동기의 특성을 근사화된 식(3.15), 식(3.16)을 이용하여 Fig.3-10처럼 velocity profile을 만들었고, motion control 할 수 있는 실험 장치에 upload를 통해 실험을 하였으며, intelligent vision sensor를 통해 payload 변위측정을 하였고, MATLAB software을 통해 측정된 변위를 분석했다. 실험은 ω_1 = 20, ω_2 = 50, ζ_1 = 0.8, ζ_2 = 1.5, t_p = 3(s), L = 0.8(m)로 설정했다.

Fig.3-21은 t_p를 포함한 modeling error에 대한 NUMZV2의 민감도를 나타내며 제어기 성능 비교에 많은 영향을 끼치는 요인이다. 실험은 이론속도 V_s = 0.2(m/s)로 설정하고, start-stop motion을 통해 cable length(L)을 바꿔가며 modeling error에 대한잔류변위를 검증 했다. 특히 start-stop motion이 포함된 UMZV2는 stop-motion이 동작 할 때의 초기조건과 t_p의 영향으로 잔류변위가 zero가 되는 지점이 발생되는 모습이 Fig.3-21에 나타난다. 하지만 UMZV2는 t_p의 변화에 대해 대응하기가 어려워 제어기의 민감성을 비교 할 수 없다.

Fig.3-22은 t_p에 대한 잔류변위 저감 성능을 보이고 있으며 NUMZV2, UMZV2를 비교 하였다. NUMZV2는 t_p에 대해 0.5cm 이하의 잔류변위 크기를 보이고 있으나 UMZV2는 최대 2cm의 잔류변위크기를 보이고 있어 UMZV2 보다 구동기의 동적 특성을 고려한 NUMZV2가 75% 개선된 제어 성능을 나타내고 있다.

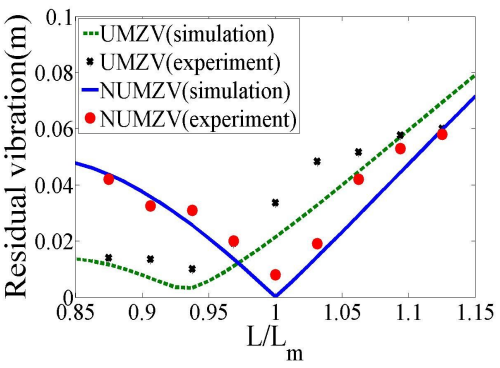


Fig. 3-21 Experimental sensitivity comparison

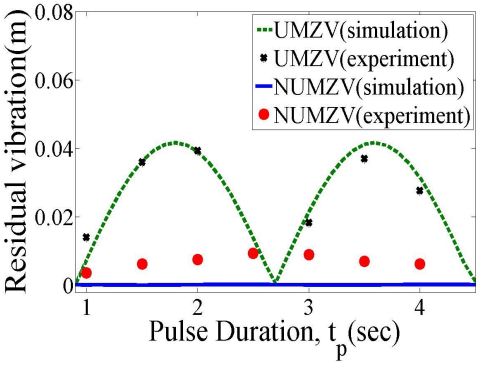


Fig. 3-22 Experimental residual vibration to t_p

제 5 절 NUMZVD controller

입력성형제어기를 설계하기 위해 사용한 주파수와 실제 유연 시스템의 주파수에 오차가 발생되면 입력성형제어기의 잔류변위 저감 성능은 감소한다. 이런 문제를 해결하기 Fig.3-23처럼 impulse의 수를 추가해 강인한 입력성형제어기가 개발된다.

비선형 시스템의 과도 및 잔류변위의 저감을 위해 NUMZV제어기를 개선하여 modelling error에 강인한 NUMZVD(Nonlinear Unit Magnitude Zero Vibration Derivative)제어기를 개발한다. NUMZVD제어기의 impulse time location을 결정하기 위해 소프트웨어 MATLAB을 활용한 numerical optimization[24] 방법을 사용하였다. 유연시스템의 start-stop motion을 위해 NUMZVD제어기를 대칭적으로 사용하여 NUMZVD2제어기를 개발한다. 또한 NUMZVD2제어기의 강인성 및 잔류변위의 저감 성능 및 과도변위 제한 성능을 실험적으로 검증한다.

$$\begin{bmatrix} A_i \\ t_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 1 & -1 & 1 \\ t_1 & t_2 & t_3 & t_4 & t_5 \end{bmatrix}$$

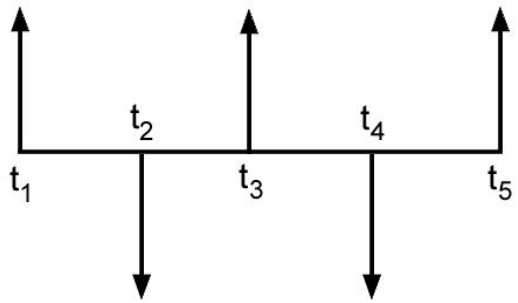


Fig.3-23 Nonlinear Unit Magnitude Zero Vibration Derivative shaper

1. NUMZVD 제어기 개발

본 절에서는 비선형 구동기의 동적특성을 고려한 입력성형제어기 NUMZV를 시스템의 modeling error에 대응하기 위해 강인한 입력성형제어기 NUMZVD (Nonlinear Unit Magnitude Zero Vibration Derivative)를 제시 한다. optimal cost function(J)은 입력성형제어기의 제어시간을 단축하기 위한 식(3.44) 이다. constraints는 비선형을 고려하여 잔류변위를 제거하기 위한 식(3.45)와 (3.46)을 사용하였고, 강인성을 추가한 식 (3.47)와 (3.48)를 사용하였다. 여기서 v와 r은 식 (3.49)이고 α와 β는 식 (3.50)이다.

$$J = \min(t_i) \tag{3.44}$$

$$\sum_{i=1}^{n} v_i A_i e^{-\zeta\omega(t_n - t_i)} \sin\left(t_i\omega\sqrt{1-\zeta^2} + r_i\right) = 0 \tag{3.45}$$

$$\sum_{i=1}^{n} v_i A_i e^{-\zeta\omega(t_n - t_i)} \cos\left(t_i\omega\sqrt{1-\zeta^2} + r_i\right) = 0 \tag{3.46}$$

$$\sum_{i=1}^{n} v_i A_i t_i e^{-\zeta\omega(t_n - t_i)} \sin\left(t_i\omega\sqrt{1-\zeta^2} + r_i\right) = 0 \tag{3.47}$$

$$\sum_{i=1}^{n} v_i A_i t_i e^{-\zeta\omega(t_n - t_i)} \cos\left(t_i\omega\sqrt{1-\zeta^2} + r_i\right) = 0 \tag{3.48}$$

$$\begin{bmatrix} v_i \\ r_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \alpha & 0 & \alpha & 0 \\ 0 & \beta & 0 & \beta & 0 \end{bmatrix} \tag{3.49}$$

$$\alpha = \frac{\dfrac{\omega_2\sqrt{4\zeta_2^2\omega_2^4 w_n^2+\omega_2^6-2\omega_2^4 w_n^2+w_n^4\omega_2^2}}{(4\zeta_2^2\omega_2^2 w_n^2+\omega_2^4-2\omega_2^2 w_n^2+w_n^4)}}{\dfrac{\omega_1\sqrt{4\zeta_1^2\omega_1^4 w_n^2+\omega_1^6-2\omega_1^4 w_n^2+w_n^4\omega_1^2}}{(4\zeta_1^2\omega_1^2 w_n^2+\omega_1^4-2\omega_1^2 w_n^2+w_n^4)}} \tag{3.50}$$

$$\beta = \tan^{-1}\frac{\omega_1^2-w_n^2}{2\zeta_1\omega_1 w_n}-\tan^{-1}\frac{\omega_2^2-w_n^2}{2\zeta_2\omega_2 w_n}$$

Fig. 3-24은 System frequency(ω_n) 변화에 따라 NUMZVD제어기의 impulse time을 MATLAB[33]의 fmincon을 사용하여 numerical optimization으로 얻어진 값들을 나타냈다. 식(3.51)는 cost function이고, 식(3.52),(3.53),(3.54),(3.55)는 MATLAB에서 사용된 constrain function이다. Table 3-1는 Fig.3-24을 2차 다항식으로 curve fitting하여 NUMZVD제어기의 switching time을 함수로 나타냈다. NUMZVD의 impulse time을 numerical optimization으로 얻기 위해서는 system frequency에 대한 초기 값에 민감하게 반응한다. 초기 값은 Singhose and Singer[27]의 의해 개발된 UMZVD(Unit Magnitude Zero Vibration Derivative)의 impulse time으로 선정했다. 초기조건은 table 3-1이다.

Table 3-1 Numerically determined negative input shaper[27]

	$t_i = (M_0 + M_1\zeta + M_2\zeta^2 + M_3\zeta^3) * T\ ,\ T = 2\pi/\omega_n$			
	M_0	M_1	M_2	M_3
t_2	0.08945	0.28411	0.23013	0.16401
t_3	0.36613	-0.08833	0.24048	0.17001
t_4	0.64277	0.29103	0.23262	0.43784
t_5	0.73228	0.00992	0.49385	0.38633

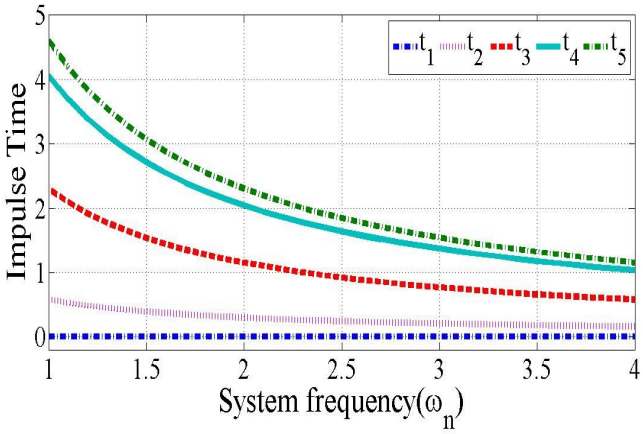


Fig. 3-24 NUMZVD shaper to ω_n

Table 3-2 Impulse time calculation of NUMZVD shaper

($\omega_1 = 20, \omega_2 = 50, \zeta_1 = 0.8, \zeta_2 = 1.5, t_p = 3(s)$)

	a	b	c
t_2	0.0534	-0.3856	0.8690
t_3	0.2184	-1.5773	3.4823
t_4	0.3834	-2.7689	6.1304
t_5	0.4367	-3.1546	6.9634

$$J = t_5 \tag{3.51}$$

$$1 - \alpha.\cos(\omega_n t_2 + \beta) + \cos(\omega_n t_3) - \alpha.\cos(\omega_n t_4 + \beta) + \cos(\omega_n t_5) = 0 \tag{3.52}$$

$$-\alpha.\sin(\omega_n t_2 + \beta) + \sin(\omega_n t_3) - \alpha.\sin(\omega_n t_4 + \beta) + \sin(\omega_n t_5) = 0 \tag{3.53}$$

$$-\alpha.t_2\cos(\omega_n t_2 + \beta) + t_3\cos(\omega_n t_3) - \alpha.t_4\cos(\omega_n t_4 + \beta) + t_5\cos(\omega_n t_5) = 0 \tag{3.54}$$

$$\alpha.t_2\sin(\omega_n t_2 + \beta) - t_3\sin(\omega_n t_3) + \alpha.t_4\sin(\omega_n t_4 + \beta) - t_5\sin(\omega_n t_5) = 0 \tag{3.55}$$

Table 3-2의 값은 $t_i = a\omega_n^2 + b\omega_n + c$ (R=0.9999) 에 대입하여 2차 다항식으로 NUMZVD제어기의 impulse time을 결정한다. NUMZVD2 제어기는 start-stop motion을 포함되었고, stop-motion을 위한 impulse time은 식(3.56), 식(3.57), 식(3.58), 식(3.59)로 나타난다.

$$t_7 = t_6 + t_5 - t_4 \tag{3.56}$$

$$t_8 = t_7 + t_4 - t_3 \tag{3.57}$$

$$t_9 = t_8 + t_3 - t_2 \tag{3.58}$$

$$t_{10} = t_9 + t_2 \tag{3.59}$$

2. NUMZVD 제어기 평가

비선형 구동기의 동적특성에 대응하고 제어기의 강인성을 증가시킨 NUMZVD의 Response는 Fig.3-25과 같다. Fig.3-26는 t_p가 포함되어져 numerical optimization으로 얻어진 NUMZVD2제어기의 Velocity profile을 나타냈다. simulation에 사용된 변수들은 다음과 같다.

$\omega_1 = 20$, $\omega_2 = 50$, $\zeta_1 = 0.8$, $\zeta_2 = 1.5$, $t_p = 2.5(\mathrm{sec})$ 설정했다. 식(3.60)은 다음 조건일 때 NUMZVD2 제어기의 amplitude와 time location이다.

$$\begin{bmatrix} A_i \\ t_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 \\ 0 & 0.1739 & 0.6369 & 1.1360 & 1.2724 & 2.5 & 2.6363 & 3.1354 & 3.5985 & 3.7724 \end{bmatrix} \tag{3.60}$$

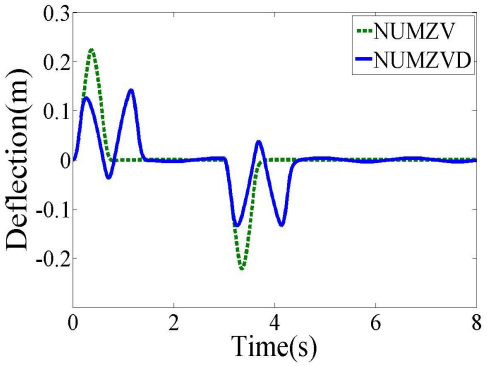


Fig. 3-25 Time response of NUMZVD shaper

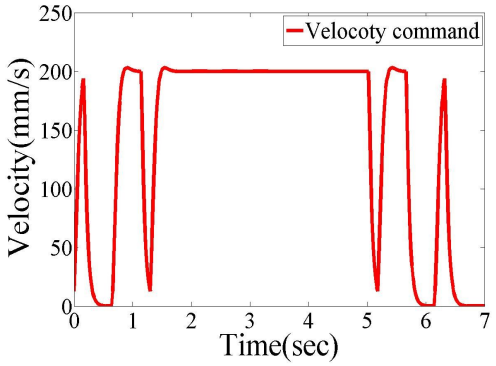


Fig. 3-26 Shaped velocity command of NUMZVD shaper

3. NUMZVD 제어기 실험적 검증

유연시스템의 비선형 구동기의 동적특성을 고려하여 잔류변위를 저감하기 위한 NUMZV제어기에 강인성을 개선한 NUMZVD제어기의 잔류변위 저감 성능을 수치 simulation 및 실험으로 검증 하였다. 실험은 simulation과 동일한 조건으로 설정 했고, 제어기의 성능을 잘 나타나는 pulse duration $t_p = 2.5(\sec)$ 선택했다. 구동기의 속도는 0.2m/s 이다. 검증 방법은 MATLAB을 활용하여 simulation을 통해 제어기 성능을 분석하고, 실험 장치를 통해 강인성 평가에 대해 검증했다. Fig.3-27는 비선형 구동기의 동적특성을 고려한 NUMZV2와 강인성을 개선한 NUMZVD2를 modeling error에 대해 강인성에 대해 검증했다. 실험결과 개발한 NUMZVD2는 UNUMZV2에 비해 system modeling error에 대해 높은 강인성을 보인다.

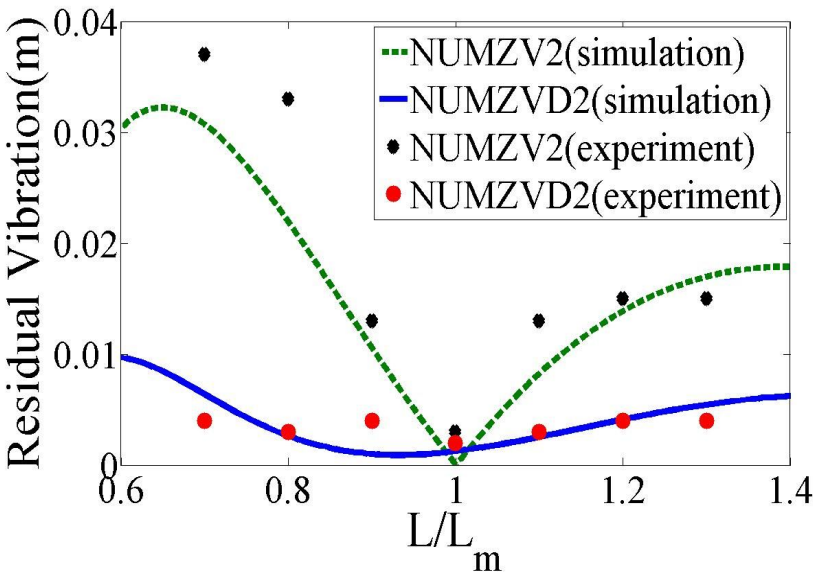


Fig. 3-27 Experimental sensitivity comparison

제 5 절 결 론

본 장에서는 비선형 구동기의 동적 특성을 포함하고, 잔류변위를 저감하기 위한 입력성형제어기를 제한 및 실험적 검증을 하였고, 다양한 응용기술을 개발하고 있다.

1. 2nd-order response function 식으로 근사화 하여 비선형구동기의 동적 특성을 표시하고, vector diagram approach를 활용하여 NUMZV를 개발했다.

2. 근사함수의 parameters 평가를 위해 numerical simulation을 통한 NUMZV의 잔류변위 저감 성능을 평가했다.

3. numerical optimization방법과 curve fitting 방법을 활용하여 NUMZV에 강인성을 향상 시킨 NUMZVD를 개발했다.

4. 유연시스템의 rest-to-rest motion을 위해 NUMZV와 NUMZVD제어기를 symmetry으로 적용하여 NUMZV2 NUMZVD2 제어기를 제시했다.

5. 제시된 NUMZV의 잔류변위 저감 성능을 실험을 통해 UMZV와 비교하여 성능 검증하였으며, modeling error에 대한 제어강인성과 효과적인 잔류변위 저감 성능을 나타내었다. 또한 NUMZVD의 성능 검증을 위해 NUMZV와 비교하여 성능을 검증했다.

제 4 장 비선형 구동기에 대한 적응입력성형제어기

본 장은 비선형 구동기의 동적 특성을 포함한 유연시스템의 잔류변위 저감 성능을 높이고, 실시간으로 유연시스템에 대응할 수 있도록 비선형 구동기의 동적특성을 1st-order response function, 2nd-order response function으로 근사화 시켜, RLS(Recursive Least Squares)[34]를 통한 비선형 구동기의 동적 특성을 갖는 unknown parameter를 추정한다. 실시간으로 추정된 parameter를 이용하여 제어기의 임펄스 위치를 실시간 tuning 하기위해 adaptive UMZVc shaper(UMZVa)와 adaptive NUMZV shaper(NUMZVa),를 개발 한다. 개발된 UMZVa 및 NUMZVa는 simulation을 통해 parameter 수렴성을 검증하고, 실험장치를 통해 잔류변위 저감 성능을 UMZV와 비교하여 제어의 성능을 검증한다.

제 1 절 소개

유연시스템은 연료 절감과 효율성을 극대화 시키기 위해 고중량의 payload 운반을 하거나, 운반 동작 속도를 증가 시켰다. 따라서 payload의 잔류변위를 저감하여 안전성을 확보할 필요가 있다.

유연시스템의 변위현상을 저감하기위해 1985년 처음으로 Smith가 Posicast방법을 개발하였다. posicast방법은 step input을 두 단계로 나누어 잔류변위를 제거한다. 그러나, 시스템 매개변수의 modelling error에 대해 강인성이 미흡하여 실용성이 낮게 나타났다. modeling error에 대해 제어성능을 개선하기 위해 Singer와 Seering은 Smith의 입력성형제어기를 개발하였다.[3-4] 입력성형제어기는 유연시스템의 연속된 임펄스가 시스템에 가해지면, 각각의 임펄스 응답이 서로 중첩되어 잔류변위가 서로 상쇄되는 원리를 이용하였다. 이렇게 얻어진 impulse sequence를 임의의 input과 convolution 하여 시스템 입력을 생성한다. Impulse의 수를 추가함으로서 modelling error에 대한 강인한 입력성형제어기가 설계된다..

numerical optimization을 활용하여 잔류변위를 제거하는 방법에 대해 많은 연구가 있었다. 최적화기법은 최적 해를 구하는데 계산이 복잡하고 가격함수는 총체적인 경로오차로 표시되어 진동모드가 특별한 경우에 반영되지 않는다. 따라서 잔류변위는 감소하여도 과도응답에서 변위가 발생될 수 있다.

Seering과 Meckl은 경사사인(ramped sinusiod)함수와 버사인(versine)함수를 이용하여 smooth input을 개발하였는데, 함수의 조합에서 유연시스템의 고유변위수 성분을 제거함므로서, 유연시스템의 가진력을 최소화하는 방법이다. 토크계산 기법은 원하는 출력의 궤적을 정의하고 그 inverse model을 이용하여 출력과 동일한 입력을 구한다. 그러나 유연시스템의 modeling error에 대한 낮은 강인성때문에 실용화에는 많은 문제를 야기 한다.

입력성형제어기법이 발표된 이후로 sliding-mode control 방법과 입력성형제어 기술을 통합한 유연시스템 변위제어를 위한 adaptive control 방법이 제시되었다.

특히 Fig 4-1처럼 adaptive input shaping은 별도의 센서를 활용하여 제어기 설계에 필요한 변수를 추정하고, 독립적으로 제어기를 설계함으로써 선형 시스템에 대응할 수 있다. adaptive control 방법은 산업현장의 비선형 시스템에 대에 대응하기 위해서 feedback control이 포함된 적응제어 기술이 개발되었다. 특히 입력성형 제어기의 설계에 가장 필요한 시스템 frequency를 추정하기 위해서 개발된 LIST(Learning Input Shaping Technique)제어 기술은 Park and Chang(2001)에 개발이 되었고, Cutforth and Pao(2004)에 의해 개선 되었다. 그러나 이러한 기술들은

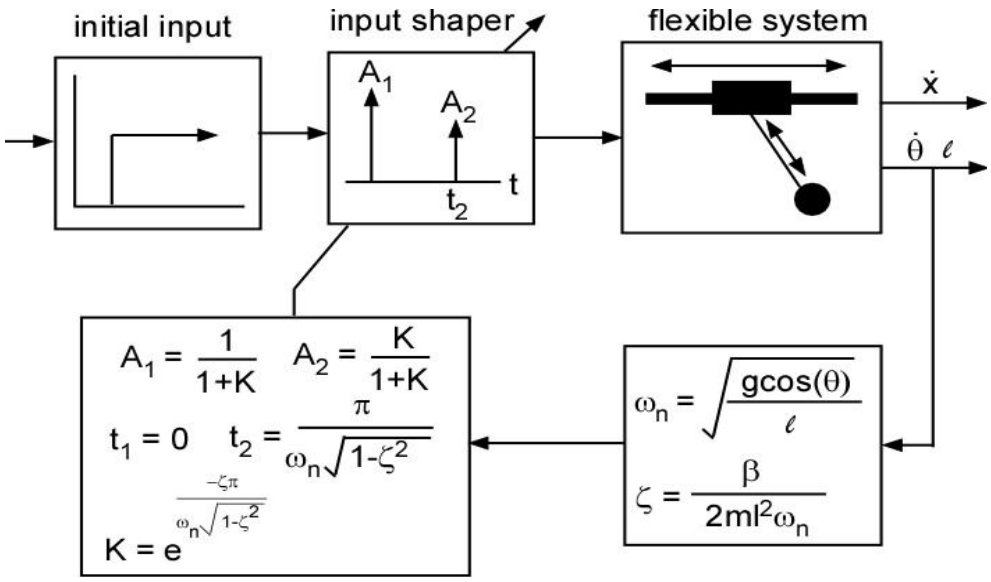


Fig. 4-1 Adaptive input shaping scheme for flexible system

선형시스템을 기반으로 설계가 되었으며, off-line에서 근을 찾기 때문에 수렴되는 시간이 길다. 이 후 Tzes(2007)에 의해 비선형 시스템의 구동기 토크를 이용해 실시간으로 시스템 frequency와 damping을 추정 하였으나, 비선형 시스템을 선형화 시켜 positive input shaper를 사용함으로써 제어시간이 길어졌다. 따라서 실제 산업현장에 반복적으로 사용되는 비선형 구동기의 동적특성이 포함된 유연시스템의 잔류변위를 효과적으로 저감시키기 위해서 비선형 구동기의 동적특성을 고려한 제어기들의 설계에 필요한 변수들을 추정을 통해 안정적으로 제어가 가능 할 수 있도록 적응입력성형제어 방법을 제시한다.

제 2절에는 RLS(Recursive Least Squares)방벙[32]을 이용하여 비선형 구동기의 1st-order dynamic 특성을 갖는 변수를 추정하고, 추정된 변수를 실시간 적용하여 UMZVc제어기의 임펄스 위치를 조율을 통해 parameter의 수렴되는데 까지 걸리는 시간을 줄이고, 유연시스템의 잔류변위 저감 성능을 높인 Adaptive UMZVc shaper(UMZVa)를 제시한다. 제시된 UMZVa제어기는 UMZV제어기와 실험적으로 비교 검증한다. 제 3절에는 RLS방벙을 이용하여 비선형 구동기의 2nd-order dynamic 특성을 갖는 변수를 추정하고, 추정된 변수를 실시간 적용하여 NUMZV 제어기의 임펄스 위치를 조율을 통해 parameter의 수렴되는데 까지 걸리는 시간을 줄이고, 유연시스템의 잔류변위 저감 성능을 높인 Adaptive NUMZV shaper(NUMZVa)를 제시한다. 제시된 NUMZVa제어기는 UMZV제어기와 실험적으로 비교 검증한다. 제 4절에는 결론으로 본장을 마무리한다.

제 2 절 Adaptive UMZVc controller

adaptive UMZVc shaper(UMZVa)는 RLS(Recursive Least Squares) 방법을 이용하여 비선형 구동기의 1st-order dynamic을 포함한 변수들을 추정하고, 실시간으로 update하여 payload의 잔류변위를 저감 시킬 수 있다. 변수 추정 방법으로 널리 적용되고 있는 RLS는 수렴특성이 우수하고 잡음에 강인한 특성을 갖는다. 따라서 RLS 방법을 이용하여 비선형 시스템의 수식적 모델을 통해 변수를 추정 할 수 있다. 비선형 구동기의 동적특성을 갖는 유연시스템의 동적 특성을 갖는 변수의 값을 얻기 위해서는 유연시스템에 비선형 구동기의 속도 data가 필요하다.

본 장에서는 RLS방법을 적용한 비선형 구동기의 1st-order dynamic 특성을 갖는τ_a, τ_b 추정하여 유연시스템의 잔류변위를 저감하기 위해 UMZVc [APPENDIX A]를 사용한 Adaptive Input Shaping 제어를 한다.

1. Mathematical modeling

비선형 구동기의 동적 특성을 가지고 있는 1차 지연요소를 추정하기 위해서는 정확한 비선형 구동기의 modeling과 pendulum 시스템의 modeling이 필요하다.

1차 지연요소를 갖는 비선형 구동기의 동적 특성은 출력이 입력의 변화에 따라 어떤 일정한 값에 도달하는데 시간지연이 있는 요소로 입, 출력 관계식은 다음과 같다.

$$G_a(s) = \frac{V_t(s)}{V_s(s)} = \frac{K}{\tau s + 1} \tag{4.1}$$

여기서, $k=1$ 이고 τ은 시상수(time constant)라 한다. 따라서 비선형 구동기의 동적특성(acceleration time constant(τ_a) ≠ deceleration time constant(τ_b))을 포함한 전달함수는

$$G_a(s) = \frac{K}{(\tau_a \cdot \gamma + \tau_b \cdot (1-\gamma))s + 1} \tag{4.2}$$

여기에

$$\gamma = \begin{cases} 1, \text{if } |pulse| > 0 \\ 0, \quad otherwise \end{cases}$$

따라서 전달함수 식(4.2)를 이용하여 state equation으로 표현하면

$$\dot{v} = \frac{-v + u}{(\tau_a \cdot \gamma + \tau_b \cdot (1-\gamma))} \tag{4.3}$$

비선형 구동기의 동적 특성을 포함한 pendulum system은 기본적으로 linear system에 비선형 구동기의 동적특성이 포함되었다. 비선형 구동기의 동적특성을 속도 프로파일 형태로 나타난다. 따라서 linear system의 입력을 비선형 구동기의 속도($V_t(s)$)로 사용했으며, Fig.4-2은 입력을 비선형 속도로 갖는 linear system의 전달함수를 나타낸다.

따라서 입력을 비선형 속도로 갖는 linear system을 수식으로 표현하면

$$G_p(s) = \frac{\phi(s)}{V_t(s)} = \frac{\frac{s}{L}}{s^2 + \omega_n^2} \tag{4.4}$$

여기서 ω_n은 system frequency이고, 시스템 입력인 $V_t(s)$는 식(4.3)와 같다.

Fig.4-3은 single mode를 갖는 pendulum system이다. 2장 1절에의 mini-crane system dynamic equation를 이용하여 Fig.4-3 시스템을 state equation로 표현하면

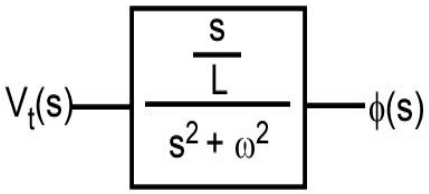


Fig. 4-2 Transfer function of a pendulum system

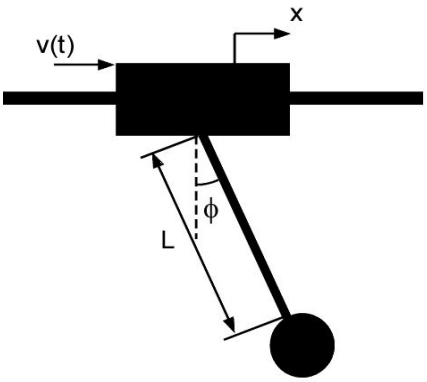


Fig. 4-3 Benchmark of a pendulum system

$$
\begin{aligned}
\dot{x}_1 &= x_2 \\
\dot{x}_2 &= -\frac{g}{L}x_1 + \frac{1}{L}\left(\frac{-x_5 + u}{\tau_a \cdot \gamma + \tau_b \cdot (1-\gamma)}\right) \\
\dot{x}_3 &= x_4 \\
\dot{x}_4 &= x_5 \\
\dot{x}_5 &= \frac{-x_5 + u}{(\tau_a \cdot \gamma + \tau_b \cdot (1-\gamma))}
\end{aligned}
\tag{4.5}
$$

여기에

$$
\vec{x} = [\phi \;\; \dot{\phi} \;\; x \;\; \dot{x} \;\; v_t]^T
$$

$$
\vec{u} = v_s \tag{4.6}
$$

미분방정식으로 이루어진 상태 방정식은 시간의 연속성을 가지고 있어 실시간 해를 이용해 실험 장치의 디지털 컴퓨터로 계산하는데 어려움이 있다. 따라서 미분방정식을 차분방정식으로 바꿔야 한다. 미분방정식을 차분방정식으로 근사화하는 간단한 방법 중의 하나인 Euler의 방법(또는 전방향 사각형 규칙(forward rectangular rule)이며, 이 근사화는 다음과 같다.

$$\dot{x} \cong \frac{x(k+1)-x(k)}{T_s} \tag{4.7}$$

여기서, T_s는 초 단위 샘플 간격($t_{k+1}-t_k$)이며, $x(k)$는 t_k에서 x의 값, $x(k+1)$는 t_{k+1}의 값이다. 따라서 식(4.7)을 이용하여 미분방정식(4.5)을 차분방정식으로 근사화 하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
x_1(k+1) &= x_2(k)T_s + x_1(k) \\
x_2(k+1) &= (-\frac{g}{L}x_1(k) + \frac{1}{L}(\frac{-x_5(k)+u(k)}{\tau_a \cdot \gamma + \tau_b \cdot (1-\gamma)}))T_s + x_2(k) \\
x_3(k+1) &= x_4(k)T_s + x_3(k) \\
x_4(k+1) &= x_5(k)T_s + x_4(k) \\
x_5(k+1) &= \frac{-x_5(k)+u(k)}{(\tau_a \cdot \gamma + \tau_b \cdot (1-\gamma))}T_s + x_5(k)
\end{aligned} \tag{4.8}$$

2. Parameter estimation of 1st-order actuators

RLS[32] 방식은 새로운 데이터가 들어올 때마다 전체의 방정식을 모두 다루어야 하는 일반적인 최소 자승법의 불편함을 없앤 방식이다. 즉, 이전까지의 데이터에 의한 최소자승법의 결과와 새로 들어온 데이터를 이용해서 이 데이터까지 포함한 새로운 최소 자승법에 의한 결과를 구하는 것이다.

RLS 방법을 이용하여 비선형 구동기의 동적 특성을 갖는 1차 지연 요소를 측정 데이터를 이용하여 변수를 추정한다.

가. acceleration time constant(τ_a) 추정

식(4.5)의 비선형 동적특성을 갖는 actuator 모델에 최소자승법을 적용하면 다음 식(4.13)과 같다.

$$W \bullet \hat{x} = y \tag{4.9}$$

여기서

$$W = \frac{x_5(k+1) - x_5(k)}{T_s}\gamma \tag{4.10}$$

W는 이득벡터 이고,

$$\hat{x} = \tau_a \tag{4.11}$$

$\hat{x}$는 추정 계수이고 식(4.11)으로 정의한다. 여기에

$$P(k) = [W^T(k)\, W(k)]^{-1} \tag{4.12}$$

$$P(k+1) = [W^T(k+1)W(k+1)]^{-1} \tag{4.13}$$

식(4.12),식(4.13)으로 정리된 P의 관계를 예비 정리(lemma)를 통해 다음과 같은 식으로 정리된다.

$$P(k+1) = P(k) - \frac{P(k)W(k)W^T(k)P(k)}{1 + W^T(k)P(k)W(k)} \tag{4.14}$$

따라서 k+1개의 방정식을 이용한 최소 자승법에 의한 결과를, k개의 방정식을 이용한 최소자승법에 의한 결과로 나타내면

$$\tau_a(k+1) = \tau_a(k) + (P(k)W(k)(y(k) - W^T\tau_a(k)) \tag{4.15}$$

이 된다. 여기서

$$y(k) = x_5(k) - u(k) - \tau_b(1-\gamma)\frac{x_5(k+1) - x_5(k)}{T_s} \tag{4.16}$$

이고, τ_b는 추정될 deceleration time constant 이다. 따라서 식(4.15)는 k개까지의 최소 자승법의 결과 값을 새로운 데이터에 의한 항에 의해서 변화시킨다는 것을 알 수 있다.

나. deceleration time constant(τ_b) 추정

비선형 구동기의 동적 특성을 갖는 τ_a 추정 방법과 동일한 구조를 갖고 RLS를 통해서 τ_b를 추정 할 수 있다. 여기서

$$W = \frac{x_5(k+1) - x_5(k)}{T_s}(1-\gamma) \tag{4.17}$$

이고,

$$\hat{x} = \tau_b \tag{4.18}$$

으로 정의 한다. 변수 추정을 위한 update rule은

$$\tau_b(k+1) = \tau_b(k) + (P(k)\,W(k)(y(k) - W^T\tau_b(k)) \tag{4.19}$$

이 된다. 여기서

$$y(k) = x_5(k) - u(k) - \tau_a\gamma\frac{x_5(k+1) - x_5(k)}{T_s} \tag{4.20}$$

이고, τ_a는 식(4.11)과 동일한 추정될 acceleration time constant 이다.

3. Adaptive UMZVc 제어기 평가

UMZVa는 시스템 구동 중 이전까지의 데이터에 의한 최소자승법의 결과와 새로 들어온 데이터를 이용해서 이 데이터까지 포함한 새로운 결과를 update 함으로써 빠르게 수렴된 결과를 얻을 수 있다.

차분방정식으로 모델링된 수식을 이용하여 빠른 해의 수렴성을 갖는 RLS 방법을 통한 비선형 구동기의 동적 특성을 갖는 1차 지연요소를 추정하여 UMZVc 제어기에 impulse 위치를 조율을 통해 비선형 구동기를 포함한 유연시스템의 잔류변위를 저감 성능을 높이는게 목표이다. 여기에 사용된 impulse 시간은 실험장치의 특성에 맞게 디지털입력성형제어기[APPENDIX C]를 적용한다.

Fig.4-4는 UMZVa을 block diagram으로 표현했다. 여기서 IS는 비선형 구동기의 동적특성을 고려한 UMZVc제어기로 RLS를 통해 실시간으로 제어기 설계에 필요한 변수들을 추정, update 한다. non-linear system model은 식(4.8)를 사용했으며 측정데이터는 구동기 속도를 이용했다.

simulation은 pendulum system에 적용했으며, table.4-1의 변수로 선택했다. 비선형 구동기의 동적특성인 1차 지연 요소를 추정하기 위해서 RLS 방법을 적용했다. 구동기의 1차 지연 요소를 추정하기 위해서 초기 $\tau_a(0)$ = 0.05s, $\tau_b(0)$=0.1s로 설정했다.

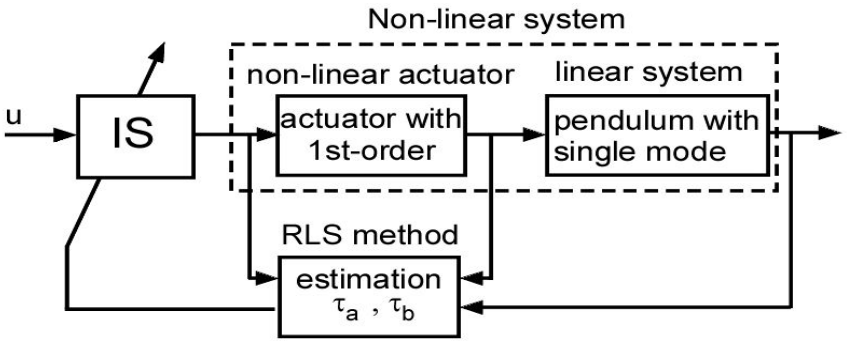


Fig. 4-4 Schematic diagram of UMZVa shaper

Fig.4-5는 비선형 구동기의 속도 데이터를 이용하여 비선형 구동기의 동적특성인 time constant를 추정되어지는 과정을 보여주고 있으며, 초기 $\tau_a(0)$, $\tau_b(0)$에 대해서 0.3(sec) 이전에 time constant가 추정되어 수렴된다. 이때 수렴된 τ_a = 0.099, τ_b = 0.0501 이며 actual time constant와 비교한 결과 99%이상 일치 한다. 여기서

$$P(0) > (W(0)^T W(0))^{-1} \tag{4.21}$$

초기 $P_{\tau_a}(0)$, $P_{\tau_b}(0)$은 최소 식(4.21)을 만족해야 한다. Fig.4-6의 simulation에 사용된 $P_{\tau_a}(0)$, $P_{\tau_a}(0)$ = 1을 사용 했다.

Table 4-1 True parameters of numerical simulation

구 분	ω_n	τ_a(sec)	τ_b(sec)
system	3.5017	0.1	0.05

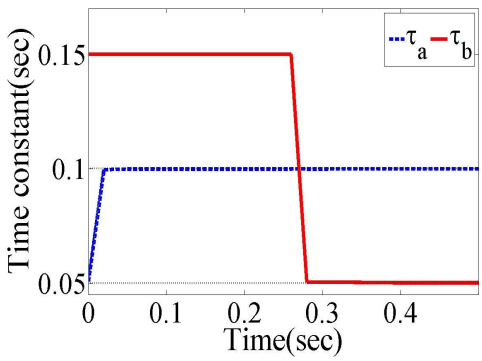


Fig. 4-5 Estimation of 1st-order parameters

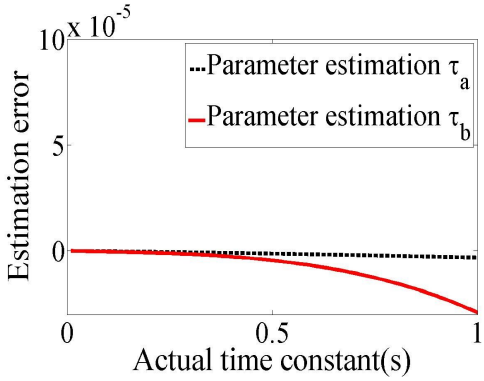


Fig. 4-6 Error of parameter estimation

다음은 UMZVa의 수렴성을 증명하기위해서 system actual value를 다양한 범위에서 RLS 방법을 통해 수렴 여부를 판단했다. Fig.4-6은 pendulum system의 time constant를 0.01(sec)～1(sec) 범위에서 RLS 방법을 통해 actual value에 수렴 되어진 결과와 비교하여 error plot을 나타냈다. 이때 simulation 방법은 시스템의 $\tau_a = \tau_b$ 조건으로 설정 한 뒤 RLS 방법을 통해 각 각 τ_a와 τ_b가 수렴되어진 과정을 보였다. 특히 τ_b는 time constant가 커질수록 system actual value에 대해 수렴된 결과가 차이가 발생된다. 하지만 system actual value 대비 수렴된 결과의 차이는 약 0.0028%로 무시 할 수 있는 수치이다.

3. Adaptive UMZVc 제어기 실험적 검증

본 연구에서 제안된 UMZVa 제어성능을 실험적으로 검증하기 위해 Siemens PLC(programmable Logic Control)을 활용하여 Fig.2-1의 mini -crane 실험 장치를 설정했다. 실험장치에는 구동기의 비선형 동적 특성을 지정할 수 있는 SCL(Structured Control Language) 프로그램을 개발 및 적용하였고, Payload의 변위측정을 위해 Intelligent Camera(VS 720 series)를 사용하였다. 입력성형제어기를 구현하기 위해 FBD(Function Block Diagram), CFC(Continuous Function Chart) 및 GUI(Graphical User Interface)를 프로그램 하였다.

Fig.4-7는 실험 장치에 포함된 구동기를 1st-order dynamic 시스템으로 설정 하는 방법을 block diagram으로 표현했다. 여기서 technology program을 통해 실험장치의 구동기의 acceleration, deceleration 설정 할 수 있으며, 비선형 1st-order dynamic 시스템을 구현하기위해서 acceleration = $3\times10^4(mm/s^2)$, deceleration = $5\times10^7(mm/s^2)$, jerk = $0.0(mm/s^3)$으로 설정하였고, driver 내부의 reference model function 통해 frequency = 10Hz, damping = 1, dead time = 0.0로 설정하여 실험 하였다.

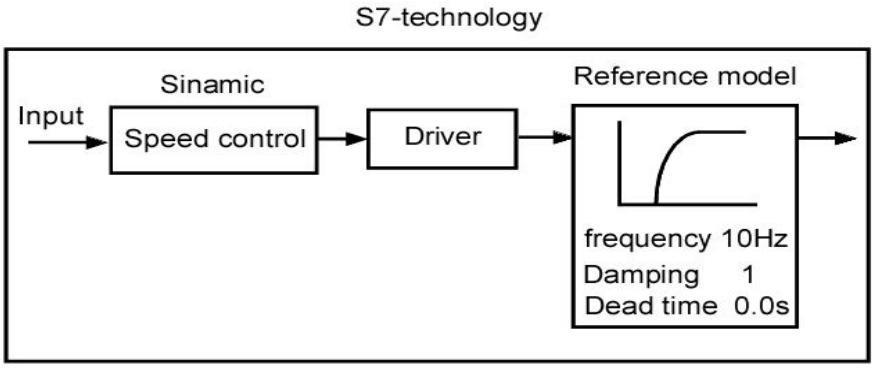


Fig. 4-7 Block diagram for nonlinear driver settings

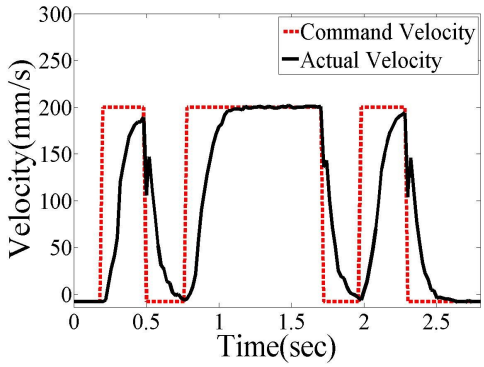


Fig. 4-8 Velocity profiles

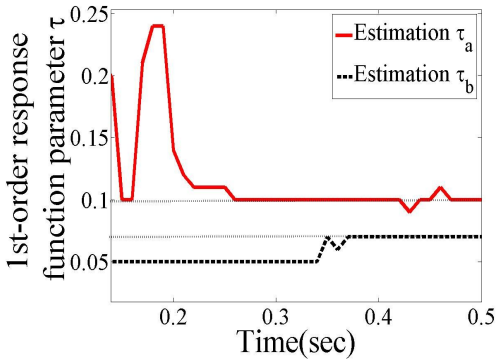


Fig. 4-9 Convergence of parameter estimation

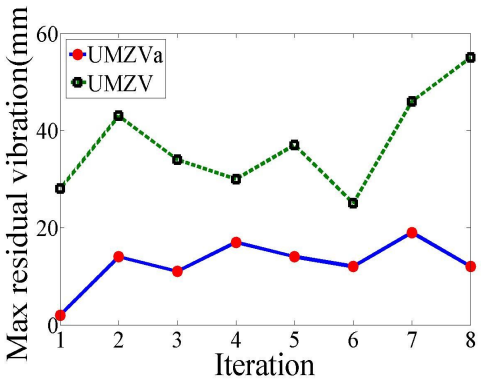
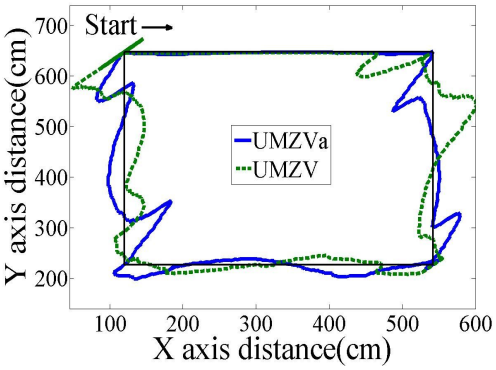
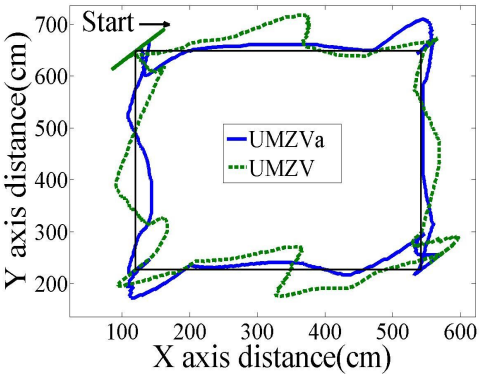


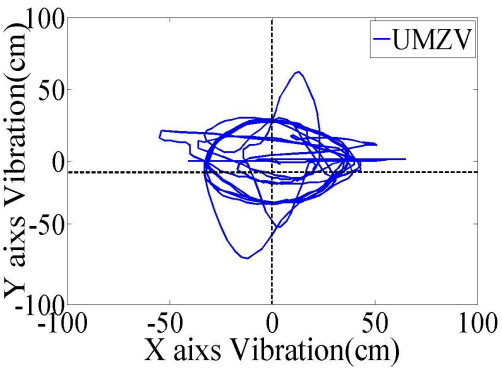
Fig. 4-10 Response comparison of UMZVa and UMZV



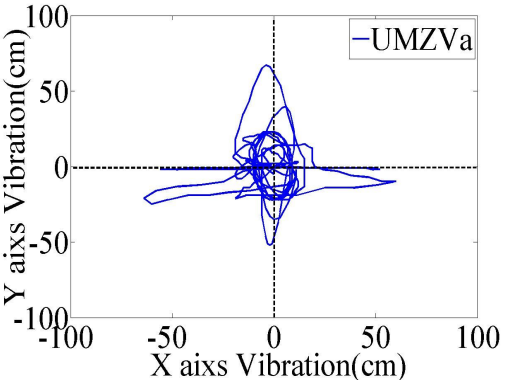
4-11 Y axis deflection of rectangular trajectory



4-12 X axis deflection of rectangular trajectory



4-13 Payload deflection trajectory UMZV shaper



4-14 Payload deflection trajectory UMZVa shaper

Fig.4-8은 실험장치의 driver setting과 동작 속도를 200mm/s로 제안을 통해 실제 실험 장치에서 발생되는 actual velocity이며, 비선형 구동기의 동적특성을 고려한 UMZVc제어기를 포함한 non-linear velocity profile이 나타냈다. 따라서 Fig.4-8의 actual velocity의 실시간 data를 이용하여 RLS방법을 적용하였으며, Fig.4-9 처럼 수식으로 근사화된 비선형 구동기의 동적특성을 포함한 τ_a, τ_b를 실시간으로 추정하고, 제어기의 임펄스 위치를 조율을 통해 비선형 시스템의 실시간으로 대응 할 수 있다. 여기에 0.2(s)이후에 수식으로 근사화된 비선형 구동기의 동적특성을 포함한 τ_a, τ_b가 수렴되고 있었으며, 그 값은 $\tau_a = 0.12(\mathrm{sec})$, $\tau_b = 0.065(\mathrm{sec})$ 이다.

Fig.4-10은 초기 $\tau_a(0) = 0.2, \tau_b(0) = 0.05$에 대한 연속적인 동작을 통해 payload의 Maximum 잔류변위 크기를 나타냈으며, 비선형 구동기의 1st-order dynamic 특성을 포함한 시스템에서 UMZVa제어기가 UMZV 제어기보다 80% 잔류변위 저감 성능을 나타난다. 여기서 사용된 $t_p = 1.5(\mathrm{sec})$ 이다.

Fig.4-11, Fig.4-12은 UMZVa와 UMZV의 동작을 연속적인 형태로 보여준 그림으로 42cm x 42cm 사각 궤적으로 움직임으로 UMZVa와 UMZV성능을 검증했다. Fig.4-12은 payload의 position과 y축 방향의 잔류변위 크기를 보여주고 있으며, Fig.4-13은 payload의 position과 x축 방향의 잔류변위 크기를 보여줌으로써 UMZVa와 UMZV의 성능을 판단 할 수 있다. Fig.4-13와 Fig.4-14 trolly가 사각궤적을 움직일 때 trolly의 위치를 제외한 잔류변위를 나타냈으며, 이때 과도변위를 제외한 순순 잔류변위는 원을 그리면 움직임을 보인다. 따라서 유연시스템의 연속적인 motion에 UMZV제어 후 잔류변위 크기 대비 UMZVa제어 후 payload의 잔류변위를 비교했을 평균 45%성능이 개선됨을 보인다.

제 3 절 Adaptive NUMZV controller

2nd-order response를 갖는 비선형 구동기의 동적특성을 고려한 적응입력성형제어는 RLS 방법을 이용하고, pendulum system의 변수들을 추정하여 payload의 잔류변위를 저감 시킬 수 있다. 변수 추정 방법은 2절에 소개된 RLS 방법을 이용하여 비선형 구동기의 동적특성을 갖는 2차 지연요소를 추정을 통해 Adaptive NUMZV shaper(NUMZVa)을 개발한다.

1. Mathematical modeling

비선형 구동기의 동적 특성을 가지고 있는 2차 지연요소를 추정하기 위해서는 정확한 비선형 구동기의 modeling과 pendulum 시스템의 modeling이 필요하다.
2차 지연요소를 갖는 비선형 구동기의 동적 특성은 출력이 입력의 변화에 따라 어떤 일정한 값에 도달하는데 시간지연이 있는 요소로 입, 출력 관계식은 다음과 같다.

$$G_a(s) = \frac{V_t(s)}{V_s(s)} = \frac{k\omega^2}{s^2 + 2\zeta\omega + \omega^2} \tag{4.22}$$

여기서, $k=1$ 이다. 따라서 비선형 구동기의 동적특성($\zeta_1 \neq \zeta_2$, $\omega_1 \neq \omega_2$)을 포함한 전달함수는

$$G_a(s) = \frac{\beta^2}{s^2 + 2\alpha\beta s + \beta^2} \tag{4.23}$$

여기에

$$\alpha = \zeta_1 \cdot \gamma + \zeta_2 \cdot (1-\gamma)$$

$$\beta = \omega_1 \cdot \gamma + \omega_2 \cdot (1-\gamma)$$

$$\gamma = \begin{cases} 1, \text{ if } |pulse| > 0 \\ 0, \quad otherwise \end{cases}$$

이다. 따라서 전달함수 식(4.22)을 이용하여 state equation으로 표현하면

$$\begin{aligned} \dot{v}_5 &= v_6 \\ \dot{v}_6 &= -2\alpha\beta v_6 - \beta^2 v_5 + \beta^2 u \end{aligned} \tag{4.24}$$

비선형 구동기의 동적 특성을 포함한 pendulum system은 기본적으로 linear system에 비선형 구동기의 동적특성이 포함되었다. 비선형 구동기의 동적특성을 속도 프로파일 형태로 나타난다. 따라서 linear system의 입력을 비선형 구동기의 속도($V_t(s)$)로 사용했으며, Fig.4-2은 입력을 비선형 속도로 갖는 linear system의 전달함수를 나타낸다.

따라서 입력을 비선형 속도로 갖는 linear system을 수식으로 표현하면

$$G(s) = \frac{\phi(s)}{V_t(s)} = \frac{\frac{s}{L}}{s^2 + \omega_n^2} \tag{4.25}$$

여기서 ω_n은 system frequency이고, 시스템 입력인 $V_t(s)$는 식(4.24)와 같다. 2장 1절에의 mini-crane system dynamic equation를 이용하여 Fig.4-3 시스템을 state equation로 표현하면

$$
\begin{aligned}
\dot{x}_1 &= x_2 \\
\dot{x}_2 &= -\frac{g}{L}x_1 + \frac{1}{L}x_6 \\
\dot{x}_3 &= x_4 \\
\dot{x}_4 &= x_6 \\
\dot{x}_5 &= x_6 \\
\dot{x}_6 &= -2\alpha\beta x_6 - \beta^2 x_5 + \beta^2 u
\end{aligned} \tag{4.26}
$$

여기에

$$
\vec{x} = [\phi \;\; \dot{\phi} \;\; x \;\; \dot{x} \;\; v_t \;\; \dot{v_t}]^T
$$

$$
\vec{u} = v_s \tag{4.27}
$$

미분방정식으로 이루어진 상태 방정식은 시간의 연속성을 가지고 있어 실시간 해를 이용해 실험 장치의 디지털 컴퓨터로 계산하는데 어려움이 있다. 따라서 미분방정식을 차분방정식으로 바꿔야 한다. 미분방정식을 차분방정식으로 근사화 하기 위해서 2절에 소개된 식(4.7)을 이용하였다.

따라서 식(4.7)을 이용하여 미분방정식(4.26)을 차분방정식으로 근사화 하면 다음과 같다.

$$
\begin{aligned}
x_1(k+1) &= x_2(k)T_s + x_1(k) \\
x_2(k+1) &= (-\frac{g}{L}x_1(k) + \frac{1}{L}x_6(k))T_s + x_2(k) \\
x_3(k+1) &= x_4(k)T_s + x_3(k) \\
x_4(k+1) &= x_6(k)T_s + x_4(k) \\
x_5(k+1) &= x_6(k)T_s + x_5(k) \\
x_6(k+1) &= (-2\alpha\beta x_6(k) - \beta^2 x_5(k) + \beta^2 u(k))T_s + x_6(k)
\end{aligned} \tag{4.28}
$$

2. Parameter estimation of 2nd-order actuators

1절 UMZVa와 동일하게 RLS 방법을 이용하여 비선형 구동기의 동적 특성을 갖는 2차 지연 요소를 측정데이터(속도, 가속도)를 이용하여 변수를 추정한다.

가. 비선형 구동기의 모델링에 포함된 ζ_1 추정

1절에 소개된 system 변수 추정 방법과 동일한 구조를 가지고 있으며, RLS를 통해서 ζ_1를 추정 할 수 있다. 여기서

$$W = -2x_6\gamma \tag{4.29}$$

이고,

$$\hat{x} = \delta_1 \tag{4.30}$$

으로 정의 한다. 변수 추정을 위한 update rule은

$$\delta_1(k+1) = \delta_1(k) + (P(k)W(k)(y(k) - W^T(k)\delta_1(k)) \tag{4.31}$$

이 된다. 여기서

$$y(k) = \frac{x_6(k+1) - x_6(k)}{T_s} + (\rho_1\gamma + \rho_2(1-\gamma))x_5(k) \tag{4.32}$$

$$-(\rho_1\gamma + \rho_2(1-\gamma))u - 2x_6(k)\delta_2(1-\gamma)$$

이고, 비선형 구동기의 동적특성을 갖는 2차 지연 요소(ζ_1)은

$$\zeta_1(k) = \frac{\delta_1(k)}{\omega_1(k)} \tag{4.33}$$

이다. 여기서 ω_1은 추정된 비선형 구동기의 동적특성을 갖는 2차 지연요소 ω_1이다.

나. 비선형 구동기의 모델링에 포함된 ζ_2 추정

비선형 구동기의 모델링에 포함된 ζ_1 추정 방법과 동일한 구조를 갖고 RLS를 통해서 ζ_2를 추정 할 수 있다. 여기서

$$W = -2x_6(1-\gamma) \tag{4.34}$$

이고,

$$\hat{x} = \delta_2 \tag{4.35}$$

으로 정의 한다. 변수 추정을 위한 update rule은

$$\delta_2(k+1) = \delta\zeta_2(k) + (P(k)\,W(k)(y(k) - W^T(k)\delta\zeta_2(k)) \tag{4.36}$$

이 된다. 여기서

$$y(k) = \frac{x_6(k+1) - x_6(k)}{T_s} + (\rho_1\gamma + \rho_2(1-\gamma))x_5(k) \tag{4.37}$$

$$-(\rho_1\gamma + \rho_2(1-\gamma))u - 2x_6(k)\rho_1.\gamma$$

이고, 비선형 구동기의 동적특성을 갖는 2차 지연 요소(ζ_2)은

$$\zeta_2(k) = \frac{\delta_2(k)}{\omega_2(k)} \tag{4.38}$$

이다. 여기서 ω_2은 추정된 비선형 구동기의 동적특성을 갖는 2차 지연요소 ω_2이다.

다. 비선형 구동기의 모델링에 포함된 ω_1 추정

비선형 구동기의 모델링에 포함된 ζ_1 추정 방법과 동일한 구조를 갖고 RLS를 통해서 ω_1를 추정 할 수 있다. 여기서

$$W = (x_5(k) - u(k))\gamma \tag{4.39}$$

이고,

$$\hat{x} = \rho_1 \tag{4.40}$$

으로 정의 한다. 변수 추정을 위한 update rule은

$$\rho_1(k+1) = \rho_1(k) + (P(k)W(k)(y(k) - W^T(k)\rho_1(k)) \tag{4.41}$$

이 된다. 여기서

$$y(k) = -2(\delta_1\gamma + \delta_2(1-\gamma))x_6(k) \tag{4.42}$$
$$-\frac{x_6(k+1)-x_6(k)}{T_s} - (x_5(k)-u(k))\rho_2(1-\gamma)$$

이고, 비선형 구동기의 동적특성을 갖는 2차 지연 요소(ω_1)은

$$\omega_1(k) = \sqrt{\rho_1(k)} \tag{4.43}$$

이다.

라. 비선형 구동기의 모델링에 포함된 ω_2 추정

비선형 구동기의 모델링에 포함된 ω_1 추정 방법과 동일한 구조를 갖고 RLS를 통해서 ω_2를 추정 할 수 있다. 여기서

$$W = (x_5(k)-u(k))(1-\gamma) \tag{4.44}$$

이고,

$$\hat{x} = \rho_2 \tag{4.45}$$

으로 정의 한다. 변수 추정을 위한 update rule은

$$\rho_2(k+1) = \rho_2(k) + (P(k)\,W(k)(y(k) - W^T(k)\rho_2(k)) \tag{4.46}$$

이 된다. 여기서

$$y(k) = -2(\delta_1\gamma + \delta_2(1-\gamma))x_6(k) \tag{4.47}$$
$$-\frac{x_6(k+1)-x_6(k)}{T_s} - (x_5(k)-u(k))\rho_1.\gamma$$

이고, 비선형 구동기의 동적특성을 갖는 2차 지연 요소(ω_2)은

$$\omega_2(k) = \sqrt{\rho_2(k)} \tag{4.48}$$

이다.

3. Adaptive NUMZV 제어기 평가

차분방정식으로 모델링된 수식을 이용하여 빠른 해의 수렴성을 갖는 RLS 방법을 통한 비선형 구동기의 동적 특성을 갖는 2차 지연요소를 추정하여 NUMZV 제어기에 impulse 위치를 조율을 통해 비선형 구동기를 포함한 유연시스템의 잔류변위를 저감 성능을 높이는게 목표이다. 여기에 사용된 impulse 시간은 실험장치의 특성에 맞게 디지털입력성형제어기[APPENDIX C]를 적용한다.

Fig.4-15는 NUMZVa 방법을 block diagram으로 표현했다. 여기서 IS는 비선형 구동기의 동적특성을 고려한 NUMZV제어기로 RLS를 통해 실시간으로 제어기 설계에 필요한 변수들을 추정, update 한다. non-linear system model은 식(4.28)를 사용했으며 측정데이터는 구동기 속도, 가속도를 이용했다.

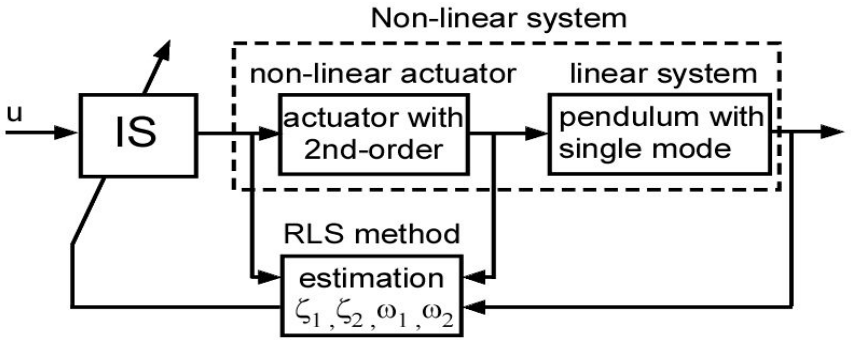


Fig. 4-15 Schematic diagram of NUMZVa shaper

Table 4-2 True parameters of numerical simulation

구 분	ω_n	ω_1	ω_2	ζ_1	ζ_2
system	3.5017	20	30	0.8	1.5

simulation은 pendulum system에 적용했으며, table.4-2의 변수로 선택했다. 비선형 구동기의 동적특성인 2차 지연 요소를 추정하기 위해서 RLS 방법을 적용했다. 수식으로 근사화된 구동기의 동적특성을 갖는 2차 지연 요소를 추정하기 위해서 초기 $\omega_1(0)$ = 30, $\omega_2(0)$=25, $\zeta_1(0)$ = 0.5, $\zeta_2(0)$=0.5로 설정했다. 그러나 RLS방법은 초기 값에 영향은 거의 없으나 양수를 선택해야 P가 줄어들지 않아 올바르게 업데이트가 된다.

Fig.4-16 는 비선형 구동기의 속도 데이터를 이용하여 비선형 구동기의 동적특성을 갖는 근사화된 함수의 변수(ζ_1, ζ_2)를 추정되어지는 과정을 보여주고 있으며, 제시되 초기 값에 대해서 0.5(sec) 이전에 근사화된 함수의 변수(ζ_1, ζ_2)가 추정되어 수렴된다. 이때 수렴된 ζ_1 = 0.802, ζ_2 = 13.996 이며 actual 2nd-order response element(t_{ζ_1}, t_{ζ_2}) 와 비교한 결과 99.9%이상 일치 한다. 안정적으로 근을 수렴시키려면 식(4.49)을 만족시켜야한다. 식(4.49)을 만족시키지 못 할 경우 근이 수렴하지 못하고 발산하는 경우도 생긴다.

$$t_2 < t_3 \tag{4.49}$$

초기 $P_{\zeta_1}(0)$은 최소 식(4.57)을 만족해야 한다. Fig.4-16의 simulation에 사용된 $P_{\zeta_1}(0)$ = $P_{\zeta_2}(0)$ = 1을 사용 했다.

$$P(0) > (W(0)^T W(0))^{-1} \tag{4.50}$$

Fig.4-16은 Fig.4-17 simulation 방법과 동일하게 설정했다. 비선형 구동기의 속도 데이터를 이용하여 비선형 구동기의 동적특성을 갖는 근사화된 함수의 변수(ω_1, ω_2)를 추정되어지는 과정을 보여주고 있으며, 제시되 초기값에 대해서 0.5(sec) 이전에 근사화된 함수의 변수(ω_1, ω_2)가 추정되어 수렴된다. 이때 수렴된 ω_1 = 20.0065, ω_2 = 29.996 이며 actual 2nd-order response element(t_{ω_1}, t_{ω_2}) 와 비교한 결과 99.9%이상 일치 한다. simulation은 P_{ω_1} = P_{ω_2} = 1×10^4을 선택했다.

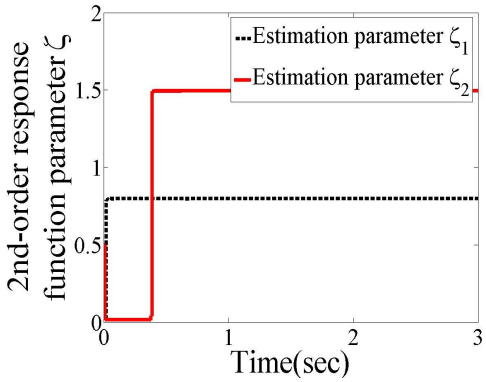


Fig. 4-16 Estimation of 2nd-order parameters(ζ_1 and ζ_2)

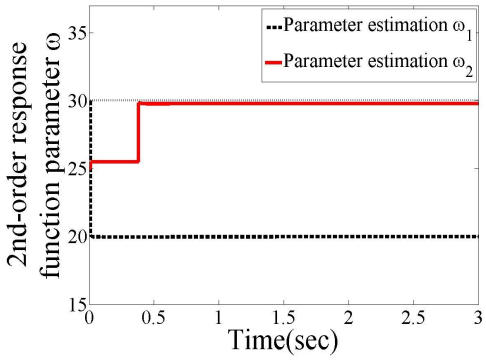


Fig. 4-17 Estimation of 2nd-order parameters(ω_1 and ω_2)

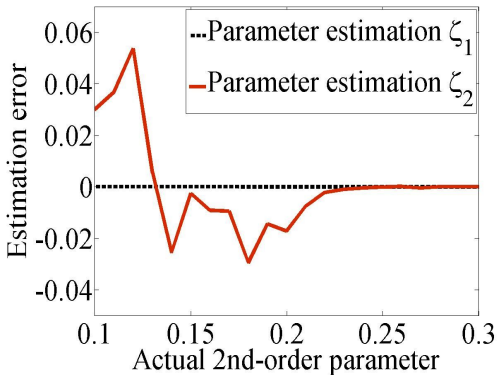


Fig. 4-18 Error of parameter estimation(ζ_1 and ζ_2)

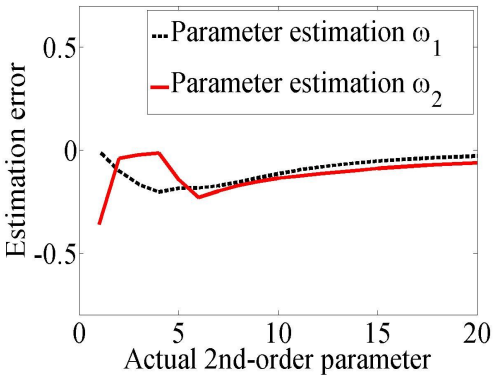


Fig. 4-19 Error of parameter estimation(ω_1 and ω_2)

다음은 NUMZVa 적응입력성형제어기의 수렴성을 평가하기 위해서 actual value를 다양한 범위에서 RLS 방법을 통해 수렴 여부를 판단했다. Fig.4-18, Fig.4-19은 비선형 구동기의 동적특성을 갖는 true value(t_{ζ_1}, t_{ζ_2}, t_{ω_1}, t_{ω_2})의 다양한 범위에서 RLS 방법을 통해 actual value에 수렴성을 평가한 error plot이다. 이때 simulation 방법은 시스템의 $t_{\zeta_1} = t_{\zeta_2}$, $t_{\omega_1} = t_{\omega_2}$ 조건으로 설정 한 뒤 RLS 방법을 통해 ζ_1, ζ_2, ω_1, ω_2가 수렴되어진 과정을 보였다. Fig.4-18은 $t_{\zeta_2} > 0.25$ 클 때 수렴된 결과

가 95%의 성능을 보인다. Fig.4-19의 결과로 $\omega_n > \omega_1,\omega_2$일 때 입력성형제어기가 설계가 올바르지 않아 25% error가 생기지만 $\omega_n < \omega_1,\omega_2$ 일 경우 10%내에 error가 발생된다.

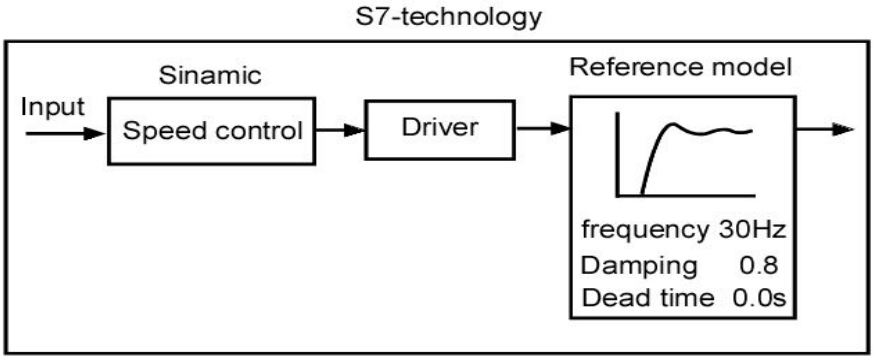


Fig. 4-20 Block diagram for nonlinear driver settings

4. Adaptive NUMZV 제어기 실험적 검증

본 연구에서 제안된 NUMZVa 제어기 성능을 실험적으로 검증하기 위해 Siemens PLC(programmable Logic Control)을 활용하여 Fig.2-1의 mini-crane 실험장치를 설정했다.

Fig. 4-20는 실험장치에 포함된 구동기를 2nd-order dynamic 시스템으로 설정하는 방법을 block diagram으로 표현했다. 여기서 technology program을 통해 실험장치의 구동기의 acceleration, deceleration 설정 할 수 있으며, 비선형 2nd-order dynamic 시스템을 구현하기위해서 acceleration = $3\times10^4(mm/s^2)$, deceleration = $5\times10^7(mm/s^2)$, jerk = $0.0(mm/s^3)$으로 설정하였고, driver 내부의 reference model function 통해 frequency = 30Hz, damping = 0.8, dead time = 0.0로 설정하여 실험 하였다.

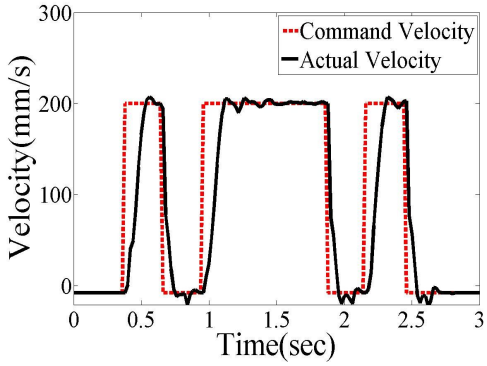


Fig. 4-21 Velocity profiles

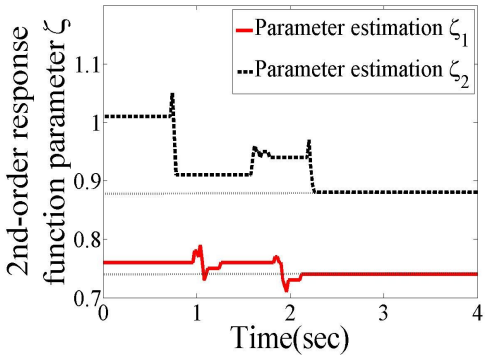


Fig. 4-22 Convergence of parameter estimation(ζ_1 and ζ_2)

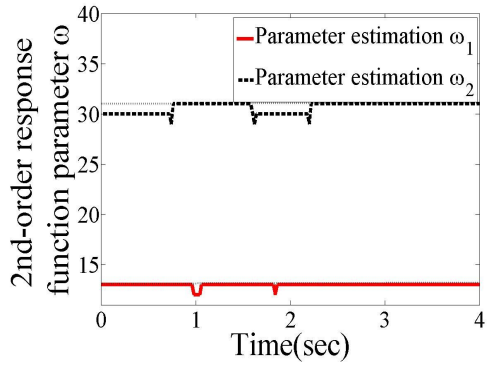


Fig. 4-23 Convergence of parameter estimation(ω_1 and ω_2)

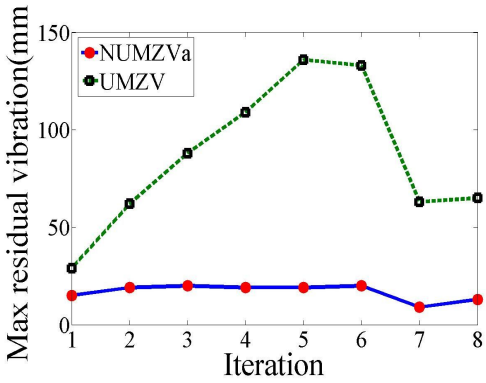


Fig. 4-24 Response comparison of NUMZVa and UMZV

Fig. 4-21은 실험장치의 driver setting과 동작 속도를 200mm/s로 제안을 통해 실제 실험장치에서 발생되는 actual velocity이며, 비선형 구동기의 동적특성을 고려한 NUMZV제어기를 포함한 non-linear actual velocity profile로 나타난다. 따라서 Fig.4-22의 actual velocity command의 실시간 data를 이용하여 RLS방법을 적용 했으며, Fig.4-23, Fig.4-24처럼 수식으로 근사화된 비선형 구동기의 동적특성을 포함한 ζ_1, ζ_2, ω_1, ω_2를 실시간으로 추정하고, 제어기의 임펄스 위치를 조율을 통해 비선형 시스템의 실시간으로 대응 할 수 있다. 여기에 2.5(sec)이후에 수식으로 근사화된 비선형 구동기의 동적특성을 포함한 ζ_1, ζ_2, ω_1, ω_2가 수렴되며, 그 값은

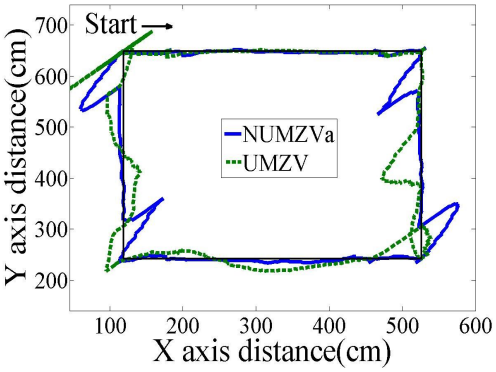


Fig.4-25 Y axis deflection of rectangular trajectory

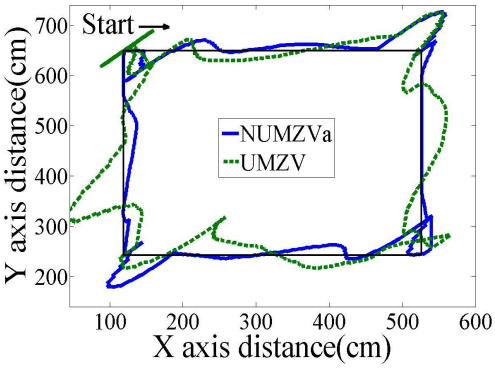


Fig.4-26 X axis deflection of rectangular trajectory

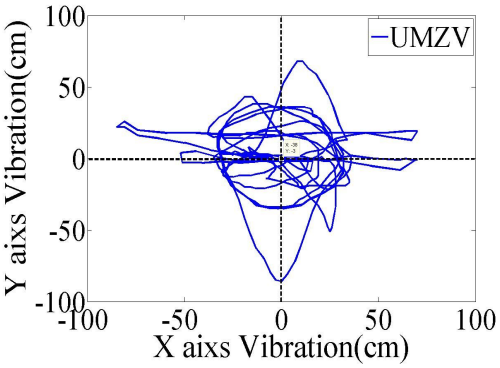


Fig.4-27 Payload deflection trajectory UMZV shaper

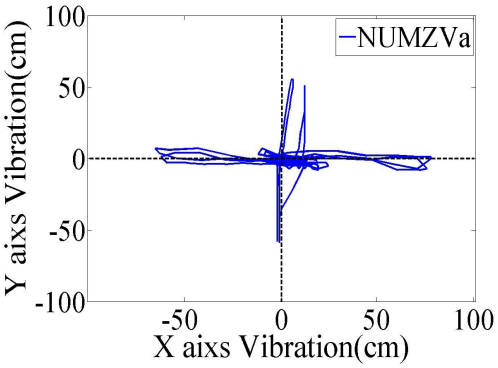


Fig.4-28 Payload deflection trajectory NUMZVa shaper

$\zeta_1 = 0.86$, $\zeta_2 = 0.81$, $\omega_1 = 31$, $\omega_2 = 13$ 이다.

Fig.4-24은 $\omega_1(0)$ = 20, $\omega_2(0)$=20, $\zeta_1(0)$ = 0.5, $\zeta_2(0)$=0.5에 대한 연속적인 동작을 통해 payload의 Maximum 잔류변위 크기를 나타냈으며, 비선형 구동기의 2nd-order dynamic 특성을 포함한 시스템에서 NUMZVa가 UMZV 보다 50% 잔류변위 저감 성능을 나타난다. 여기서 사용된 $tp = 1.5(s)$ 이다.

Fig.4-25, Fig.4-26은 NUMZVa와 UMZV의 성능을 연속적인 형태로 보여준 그림으로 42cm x 42cm 사각 궤적으로 움직임으로 NUMZVa와 UMZV의 성능을 검증했다. Fig.4-25은 payload의 position과 y축 방향의 잔류변위 크기를 보여주고 있으며, Fig.4-26은 payload의 position과 x축 방향의 잔류변위 크기를 보여줌으로써

NUMZVa와 UMZV의 성능을 판단 할 수 있다. Fig.4-27와 Fig.4-28은 trolly가 사각궤적을 움직일 때 trolly의 위치를 제외한 잔류변위를 나타냈으며, 이때 과도변위를 제외한 순순 잔류변위는 원을 그리면 움직임을 보인다. 따라서 유연시스템의 연속적인 motion에 UMZV제어 후 잔류변위 크기 대비 NUMZVa 제어 후 payload의 잔류변위를 비교했을 90%성능이 개선됨을 보인다.

제 4 절 결 론

1. 비선형 구동기의 1st-order dynamic 특성을 포함한 시스템에 RLS(Recursive Least Squares)방법을 적용하여, 수식으로 근사화된 1차 지연요소를 simulation에서는 99%의 수렴성을 보이나, 실제 실험 장치에서는 simulation과 실험 결과의 잔류변위 크기를 비교했을 때 80%의 수렴성이 보인다.

2. 비선형 구동기의 2nd-order dynamic 특성을 포함한 시스템에 RLS(Recursive Least Squares)방법을 적용하여, 수식으로 근사화된 2차 지연요소를 simulation에서는 99.6%의 수렴성을 보이나, 실제 실험 장치에서는 simulation과 실험 결과의 잔류변위 크기를 비교했을 때 85%의 수렴성이 보인다.

3. 추정된 1차 지연요소를 이용하여 실시간으로 UMZVc(Unit Magnitude Zero Vibration Compensated)의 임펄스 위치를 조율을 통해 비선형 구동기의 동적 특성을 갖는 시스템에 대응 할 수 Adaptive UMZVc shaper(UMZVa)를 개발 했다.

4. 추정된 2차 지연요소를 이용하여 실시간으로 NUMZV 제어기의 임펄스 위치를 조율을 통해 비선형 구동기의 동적특성을 갖는 시스템에 대응 할 수 Adaptive NUMZV shaper(NUMZVa)를 개발 했다.

5. UMZVa 제어기는 UMZV 제어기에 비해 80%의 잔류변위 저감성능을 보이고 있으며, 연속적인 motion에서의 제어 성능은 UMZV 제어기에 비해 UMZVa 제어기가 45%의 잔류변위 저감성능을 보인다.

6. NUMZVa 제어기는 UMZV 제어기에 비해 50%의 잔류변위 저감성능을 보이고 있으며, 연속적인 motion에서의 제어 성능은 UMZV 제어기에 비해 NUMZVa 제어기가 90%의 잔류변위 저감성능을 보인다.

제 5 장 결 론 및 향후 연구계획

제 1 절 결 론

본 논문에서는 비선형 구동기를 고려하고 잔류변위를 제한하기 위한 입력성형제어기를 개발하고, 여기에 강인성을 추가한 입력성형제어기를 개발 하였다. 또한, 수식으로 근사화된 비선형 구동기의 동적 특성을 갖는 1차 지연요소, 2차 지연요소를 RLS(Recursive Least Squares)방법을 통해 추정하고, 실시간으로 대응할 수 있도록 Adaptive UMZVc shaper(UMZVa)와 Adaptive NUMZV shaper (NUMZVa) 개발 했다.

1. 입력성형제어기의 성능을 실험과 실시간 적응 제어하기 위해 PLC (Programable Logic shaper)와 intelligent vision sensor을 활용하여 mini-crane 실험장치에서 알고리즘을 개발했다.

2. 비선형 구동기의 동적특성을 분석하고 vector diagram approach를 활용하여, 비선형 구동기의 동적특성을 고려한 입력성형제어기 NUMZV(Nonlinear Unit Magnitude Zero Vibration)를 개발했다.

3. NUMZV제어기에 강인성을 추가하여 NUMZVD(Nonlinear Unit Magnitude Zero Vibration Derivative)제어기를 개발하고, 유연시스템의 rest-to-rest motion 위해 NUMZVD2제어기를 개발했다.

4. 비선형 구동기의 동적 특성을 수식으로 근사화 하였고, 근사화된 수식 modeling을 통해 실시간 데이터을 이용하여 RLS(Recursive Least Squares)방법을 통해 근사화된 modeling의 parameter를 추정하고, 비선형 구동기의 동적 특성을 고려한 입력성형제어기에 실시간 대응 할 수 있도록 제어방법인 Adaptive UMZVc shaper(UMZVa)와 Adaptive NUMZV shaper (NUMZVa)을 개발했다.

제 2 절 향후 연구계획

수렴성이 좋은 RLS를 통해 비선형 구동기의 동적특성을 갖는 parameter를 실시간으로 추정을 하여 adaptive 적응입력성형제기를 개발 했다. 그러나 simulation의 평가와 실험적 검증을 통해 비교한 실험 결과가 simulation 결과 보다10%이하의 성능이 나타났다. 이와 같은 결과는 측정된 실험 data의 잡음과 외부적인 요인으로 인해 수렴성이 떨어져, 결과에 반영되었다. 따라서 다음과 같은 연구를 통해 실험장치에서 수렴성을 높여할 필요성이 있다.

1. 실험장치의 서보모터를 안정적으로 제어하기 위해서 low-pass filter와 speed control function의 gain 설정을 통해 부드러운 비선형 속도 profile을 만들어 MATLAB에서 구현했던 비선형 속도 profile과 동일하게 만든다.

2. 시간 영역에서 얻어진 비선형 구동기의 동적특성을 고려한 입력성형제어기들은 컴퓨터 실험장치의 성능에 의해 오차가 발생한다. 따라서 디지털 영역에서 비선형 구동기의 동적 특성을 고려한 입력성형제어기들을 개발할 필요가 있다.

3. adaptive input shaping shaper를 사용함으로서 비선형 구동기의 동적특성을 갖는 변수를 추정하여 비선형 구동기의 동적특성을 고려한 입력성형제어기에 적용할 수 있다. 하지만 실제 시스템 데이터에서 나오는 측정값을 통한 계산은 외란과 잡음에 민감하게 반응하여 좋지 않은 결과가 나오기도 한다. 따라서 시스템의 response에 대해 feedback 제어를 도입하여 입력성형제어기들의 초기조건에 대응 할 수 있는 feedback shaper가 필요하다.

4. RLS는 실시간으로 data를 이용하여 변수를 추정하지만 본 연구에서는 외란과 잡음에 대해 고려하지 않았다. 따라서 kalman filter를 적용하여 외란과 잡음에 대응 할 수 있는 adaptive shaper가 필요하다.

Reference

1. Smith, O. J. M, 1985, Feedback Control Systems, Mcgraw-Hill, New York. P338

2. Tallman, G.H, and Smith, G.H, 1958,"Analog study of Dead-Beat P osicast Control," IRE Transactions on Automatic Control, Vol. AC-3, pp. 14~21.

3. Singer, N. C. and Seering, W. P, 1990, "Preshaping Command Inputs of Reduce System Vibration, ASME J. Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 112, pp. 76~82

4. Singer, Neil C., 1988, "Residual Vibration Reduction in Computer Controlled Machines," Ph. D thesis, Department of Mechanical Engineering. MIT. also AI-TR-1030, The Artificial Intelligence Laboratory, Massachusetts Institute fo Technology, Cambridge, Mass.

5. Sung, Y. G, Jang, I. S , Jang, W. S, 2009, "Evaluate of input shaping controller with flexible system", Proceedings of the KSME 2009 Spring Annual Meetings.

6. Chun, Hon M., Turner, James, D. and Juang, Jer-Nam, 1985, Di s turbance Accommodating Tracking Maneuvers of Flexible Spacecraft, Journal of the Astronautical Sciences, Vol. 33, No. 2,pp. 197~216.

7. Junkins, John L. and Turner, James K., 1986, Optimal Spacecraft Rotational Maneuvers, Elsevier Science Publishers, New York.

8. Meckl, Peter H. and Seering. Warren P.,1985, "Minmizing Residual Vibration for Point-to-Point Motion," ASME Journal of Vibration, Acoustics, Stress, and Reliability in Design, Vol. 107, No.4,pp.378~382.

9. Gene F. Franklin, J David Powell, 1995, "FEEDBACK CONTROL OF DYNAMIC SYSTEM", p689~692

10. Sung, Y. G, Singhose, W, 2007, "Closed-Form Specified-Fuel Commands for Two-Mode Systems," IEEE. Control, and automation, pp.74~79.

11. Sung, Y. G, Singhose, W, 2008, "Deflection-Limiting Commands to Slew Flexible Systems with Velocity Limits,", IEEE ,Control, Automation and Systems, pp.2234~2239.

12. Sung, Y. G, Singhose, W, 2009, "Limited-state commands for systems with two flexible modes", Mechatronics, Vol.19, pp.780~787.

13. Singhose, W, Singer, N. C. and Seering, 1997, "On-Off Control of Flexible Spacecraft with Specified Fuel Usage", Proceedings of the American Control Conference Albuquerque, pp. 2308~2312.

14. Lawrence, J., Singhose, W, and Hekman, K., \Friction-compensating command shaping for vibration reduction," *ASME J. of Vibration and Acoustics*, vol. 127, pp. 307~314, 2005.

15. Singer, N. C. and Seering, W. P, "Preshaping Command Inputs to Reduce System Vibration," J. of Dynamic Sys., Measurement, and

Control, vol. 112, pp. 76~82, 1990.

16. Sung, Y. G, Singhose, W, 2008, "Robustness analysis of input shaping commands for two-mode flexible systems," IET. Control, Theory and applications, Vol.3, pp.722~730.

17. Robertson, M. 2005, "Command Generation for Tethered Satellite Systems", Ph. D. Thesis, Georgia Institute of Technology, USA.

18. Singh, T, and Singhose, W, "Tutorial on Input Shaping/Time Delay Control of Maneuvering Flexible Structures", in American Control Conference, Anchorage, AK, 2002

19. Singhose, W. Seering, W. P., and Singer, N., \Residual vibration reduction using vector diagrams to generate shaped inputs," *J. of Mechanical Design*, vol. 116, pp. 654~659, 1994.

20. Shaping Inputs to Reduce Vibration: A Vector Diagram Approach Singhose, W, Seering, W. P, and Singer, N, \Shaping inputs to reduce vibration: A vector diagram approach", in IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1990.

21. Blackburn, D. F., Singhose, W., Kitchen, J. P., Petrangenaru, V. P., Lawrence, J., Kamoi, T., and Taura, A., \Advanced input shaping algorithm for nonlinear tower crane dynamics," in 8th International Conference on Motion and Vibration Control, (Daejeon, Korea), 2006.

22. Jean-Jacques E, Slotine Weiping Li, 1991, Applied Nonlinear Control, Prentice Hall.

23. Lawrence, J., Singhose, W, and Hekman, K., "Command Shaping Under Nonsysmetrical Acceleration and Braking Dynamic,", 2008, *ASME J. of Vibration and Acoustics*, vol. 130,

24. smith, J. Y., Kozak, K., and Singhose, W., \Input shaping for a simple nonlinear system," in *American Control Conference*, (Anchorage, AK), pp. 821~826, 2002.

25. Lawrence, J. 2006, "Crane Oscillation Control: Nonlinear Elements and Educational Improvements", Ph. D. Thesis, Georgia Institute of Technology, USA.

26. H. R. Pota, 2005, "Step Response of Second-order Systems and Damping Ratio

27. Singhose, W, Seering, W. P. and Singer, N. C, 1997, "Time-Optimal Negative Input Shapers," ASME J. Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 115, pp. 198~205.

28. Sung, Y. G, 1999, "Adaptive robust vibration control with input shaping as a flexible maneuver strategy," KSME International journal, Vol.13, pp.807~817.

29. Jury Park and Pyung-Hun Chang, 2001,'"Learning input Shaping Techniqe for Non-LTI system, Transactions of the *ASME,* vol. 123

30. Craig F.Cutforth and Lucy Pao, 2004, "adaptive input shaping for maneuvering flexible system structures" IEEE ,Control,

Automation and Systems, pp.2234~2239.

31. Anthony Tzes, "Aaptive input shaping nonlinear", 2007, ASME J. Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 119

32. 지영준, 김화중 허정권 공저, "c로 구현한 수치해석",1994, 높이높이, p185~195

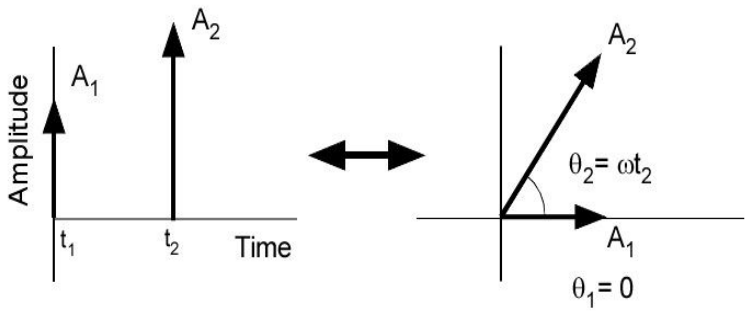
33. Duane Hanselman, Bruce Littlefield "Mastering MATLAB 7",2006, Prentice hall

34. Siemens Automation and Drives, " SIMATIC S7-SCL V5.3 for S7-300/400", Siemens Software Manual, 2005.

APPENDIX A

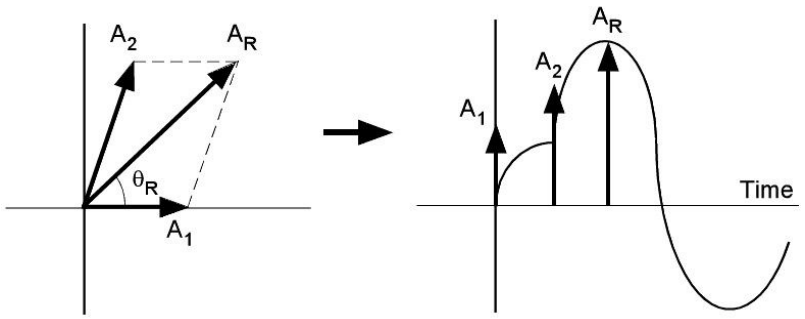
Vector diagram approach

입력성형제어기의 설계과정을 단순화하기 위해 graphical method로 vector calculus를 이용하여 impulse의 크기와 시간을 결정하기 위해 vector diagram approach가 개발 되었다. impulse의 크기를 vector의 크기로 나타내고 시간을 vector의 각으로 표시한다. Fig. 1는 impulse sequence를 (a)시간 영역 과 (b) vector 영역으로 표시하면, 시간영역에서 A_1와 A_2 는 vector의 크기로 나타나고, t_1 및 t_2 는 $\Theta_1=0$ 와 $\Theta_2=\omega t_2$ 로 표현된다. Fig. 1 (b)의 A_1 와 A_2가 합은 Fig. 2 (a)에서와 같이 A_R의 크기에 따라 impulse sequence에 의해 잔류변위는 Fig. 2 (b)로 나타난다.



(a) Impulse sequence (b) Vector diagram

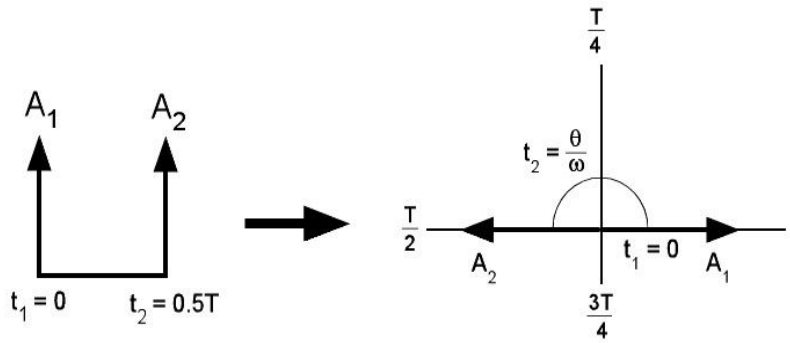
Fig. 1 A vector diagram approach



(a) Vector diagram (b) Time domain

Fig. 2 Residual vibration by impulse sequence

Fig. 3의 (b)는 (a)의 ZV제어기의 vector diagram으로 표현한 것이다. vector sum이 (0)zero인 Θ를 구하면, zero residual vibration을 위한 각각의 impulse의 time location을 쉽게 결정 할 수 있다.



(a) ZV shaper (b) Vector diagram of ZV shaper

Fig. 3 Vector diagram approach of ZV shaper

APPENDIX B

UMZVc 제어기

Lawrence는 선형 입력성형제어기에 비선형 구동기의 영향으로 발생되는 가속도 및 감속도에 의한 시간지연을 고려하여, 구동기의 비선형 동적 특성을 1st-order response function로 근사화하고, vector diagram approach를 활용하여 비선형 구동기의 1st-order dynamic에 대응하는 입력성형제어기 UMZVc를 개발했다.

$$t_2 = \frac{1}{\omega}\left(\tan^{-1}\left(\frac{1}{\omega\tau_b}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{1}{\omega\tau_a}\right) + \cos^{-1}\left(\frac{1}{\beta} + \frac{\beta}{4} - \frac{(1/v_{\max})^2}{\beta}\right)\right) \quad (1)$$

$$t_3 = \frac{1}{\omega}cos^{-1}\left(\frac{v_{\max}}{2A_3}\left(\frac{1}{4}\beta^2 - 1\right) - \frac{1}{2v_{\max}}\right) \quad (2)$$

여기서 β는 식(3) 이고 t_1 은 0 이다.

$$\beta = 2\sqrt{\frac{(\tau_a\omega)^2 + 1}{(\tau_b\omega)^2 + 1}} \quad (3)$$

시스템의 stop motion을 위한 UMZV$_C$2제어기도 start motion의 UMZV$_C$제어기와 동일한 방법으로 구할 수 있다.

$$t_5 = \frac{1}{\omega}\left(\tan^{-1}\left(\frac{1}{\omega\tau_a}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{1}{\omega\tau_b}\right) + \cos^{-1}\left(\frac{1}{\beta' v_{\max}} + \frac{\beta' v_{\max}}{4} - \frac{v_{\max}}{\beta'}\right)\right) \quad (4)$$

$$t_6 = \frac{1}{\omega} cos^{-1}\left(\frac{v_{\max}(\beta')^2}{8} - \frac{v_{\max}}{2} - \frac{1}{2v_{\max}}\right) \quad (5)$$

$$\beta' = 2\sqrt{\frac{(\tau_b\omega)^2 + 1}{(\tau_a\omega)^2 + 1}} \quad (6)$$

APPENDIX C

Digital 입력성형 제어기

개발된 입력성형 제어기들은 시간영역에서 설계가 되었다. 따라서 개발된 제어기들을 실제 유연시스템에 적용하는데 어려움이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 많은 연구가 진행 되었다. 특히 optimization control, z-영역, fourier series를 이용하여 제어기를 설계 했다. 이렇게 개발된 digital 입력성형제어기들은 기존의 개발된 제어기들과 달리 impulse 수가 증가 할 뿐 아니라 impulse 크기가 변질 되어 전혀 다른 형태의 제어기가 만들어졌다. 따라서 이런 제어기들은 유연시스템에 실시간으로 대응하기 어렵고. 제어기 pulse duration 길어지게 되어 비효율적 성능이 나타난다.

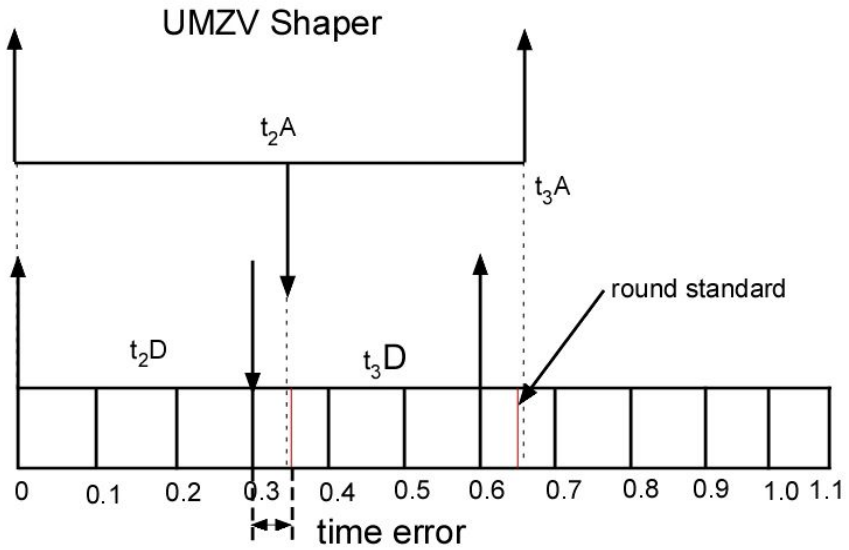


Fig. 4 Discrete input shaper process

fig. 4은 시간영역에서 개발된 UMZV를 digital 영역으로 움직여지는 과정을 보여준다. digital 영역에서 UMZV는 조건식 $\triangle t_{digital} \cong \triangle t_{analoge}$ 을 이용하여 반올림

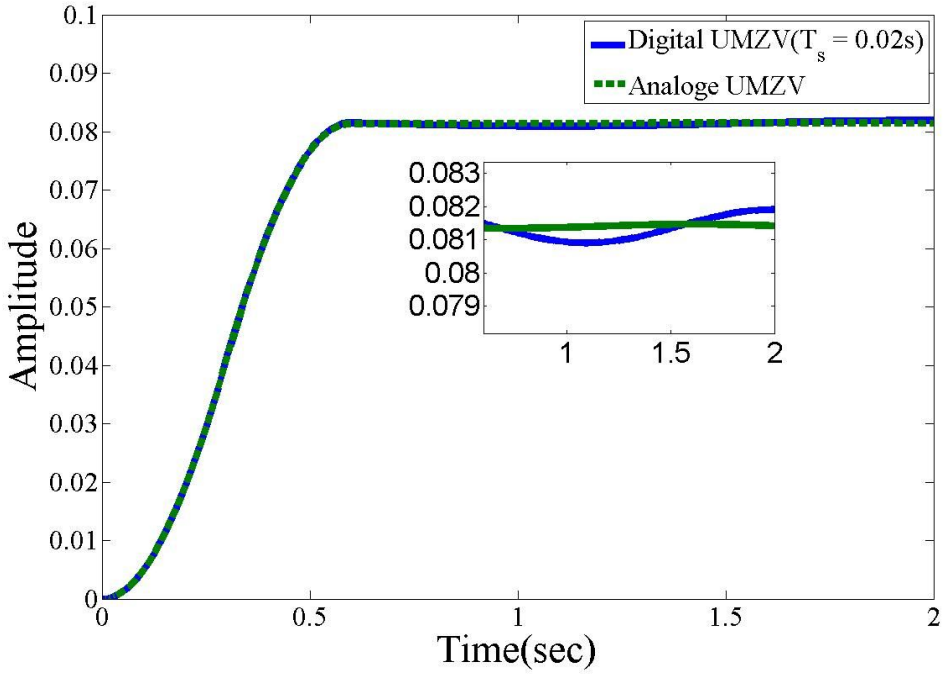


Fig. 5 Response of digital UMZV and analoge UMZV

(round)과 $\triangle t$을 통해 sampling 간격으로 다시 나열된다. digital UMZV의 impulse 시간 t_2D, t_3D 는 식(7), 식(8)로 표현된다. 이렇게 재 나열된 digital UMZV는 본래의 특징을 그대로 가지고 있으면서 digital 영역에서 표현이 가능하게 되고, 유연 시스템에서 실시간 대응 할 수 있을 뿐 아니라, 시스템의 성능이 좋을수록 시간영역에서 얻어지는 성능에 매우 가깝게 된다.

$$t_2D = round(\frac{t_2A}{T_s}) * T_s \tag{7}$$

$$t_3D = round(\frac{t_3A}{T_s} + (\triangle t)) * T_s \tag{8}$$

$$\triangle t = \frac{t_2A}{T_s} - \frac{t_2D}{T_s}$$

식(7)와 식(8)를 이용하여 개발한 digital UMZV와 기존의 analog UMZV를 simulation을 통해 비교했다. T_s(sampling time)은 0.02s 이다. Fig.5에 나타난 결과처럼 digital UMZV와 기존의 analog UMZV의 차이가 잔류변위 변위 5% 이내에 도달했을 알 수 있다. 그러나 digital UMZV는 제어장치의 성능에 의해 많은 영향을 받고, 특히 비선형 구동기의 동적 특성에 대해 민감하다.