(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2015-0093997
(43) 공개일자 2015년08월19일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G06F 19/00 (2011.01) *F16F 15/02* (2006.01)
G06F 17/10 (2006.01)
(21) 출원번호 10-2014-0014715
(22) 출원일자 2014년02월10일
심사청구일자 2014년02월10일

(71) 출원인
조선대학교산학협력단
광주광역시 동구 필문대로 309 (서석동)
(72) 발명자
성윤경
광주광역시 동구 필문대로 309 (서석동)
민윤상
광주광역시 남구 용대로183번안길 5-11 (방림동)
(74) 대리인
특허법인충정

전체 청구항 수 : 총 5 항

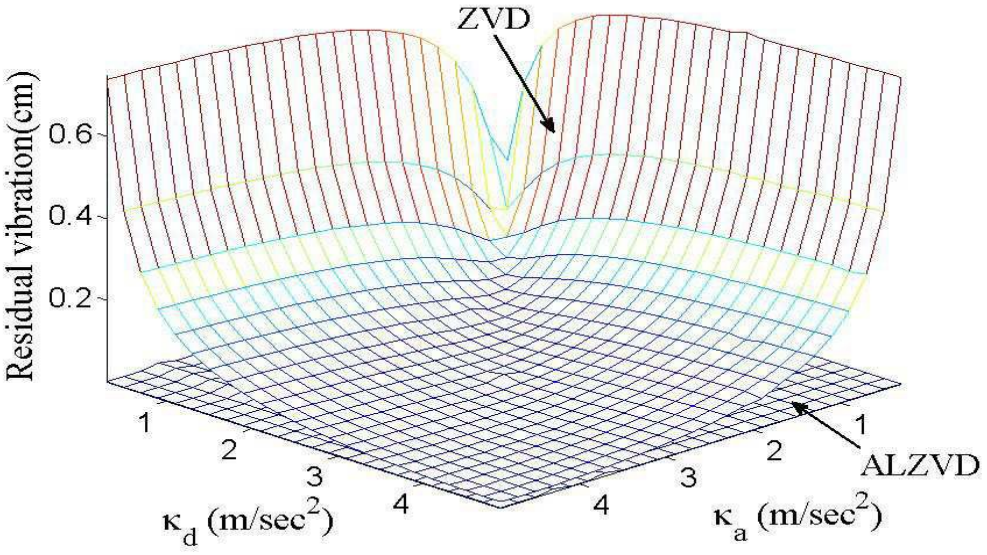
(54) 발명의 명칭 **가속도 제한된 유연시스템에 대한 강건 입력성형 제어방법**

(57) 요 약

본 발명은 가속도 제한된 유연시스템에 대한 강건 입력성형 제어방법에 관한 것으로서, 기존의 linear 기반의 입력성형 방법을 활용할 때 도면 6 과같이 가속도제한 구동기를 거치면서 명령이 ramp형태로 왜곡되는 현상이 나타나며 이에 따라 시스템의 잔류변위저감 성능 및 강건성이 감소한다. 이와 같은 문제 해결을 위해 유연시스템의

(뒷면에 계속)

대 표 도 - 도9



운동에서 Pendulum System의 전달함수를 이용하여 페이저(phasor) 벡터의 형태로 나타낸 잔류변위에 대한 변위 벡터를 이용한 펄스 시점(t_p)에 따른 각각의 임펄스 A_1과 A_2 및 A_3에 대한 벡터 $\overrightarrow{V_1}$, $\overrightarrow{V_2}$, $\overrightarrow{V_3}$를 구하고, 상기 세 벡터를 이용하여 상기 유연시스템의 운동 중의 잔류 진동 감소를 위한 임펄스의 시간 t_2와 t_3를 다음과 같은 식으로 계산하며, 상기와 같은 방법으로 유연시스템의 운동 후의 잔류 진동 감소를 위한 임펄스의 시간 t_5와 t_6를 다음과 같은 수학식으로 구하여, 상기 상기 임펄스 시간 t_2, t_3, t_5 및 t_6를 활용하여 가속도 제한 형태의 속도 명령인 ramped step과의 convolution을 통해 새로 성형된 명령을 입력 커맨드로 활용하여 가속도가 제한된 상기 유연시스템의 운동을 위한 잔류 진동을 감소하도록 한 것이다.

이 발명을 지원한 국가연구개발사업
과제고유번호 LINC-2012-21
부처명 교육과학기술부
연구관리전문기관 한국연구재단
연구사업명 산학협력 선도대학 육성사업(LINC) 기술개발과제
연구과제명 EV동력계의 성능개선을 위한 강건통합제어기술
기 여 율 1/2
주관기관 조선대학교
연구기간 2013.04.01 ~ 2014.01.31이 발명을 지원한 국가연구개발사업
과제고유번호 2012R1A1A4A01015464
부처명 교육과학기술부
연구관리전문기관 한국연구재단
연구사업명 지역대학우수과학자지원사업
연구과제명 비선형유연시스템의 변위저감을 위한 강건제어기술의 연구
기 여 율 1/2
주관기관 조선대학교
연구기간 2012.05.01 ~ 2015.04.30

명 세 서

청구범위

청구항 1

유연시스템의 운동에서 Pendulum System의 전달함수를 이용하여 페이저(phasor) 벡터의 형태로 나타낸 잔류변위에 대한 변위 벡터를 이용한 펄스 시점(t_p)에 따른 각각의 임펄스 A_1과 A_2 및 A_3에 대한 벡터 $\overrightarrow{V_1}$, $\overrightarrow{V_2}$, $\overrightarrow{V_3}$를 구하고,

상기 세 벡터를 이용하여 상기 유연시스템의 운동 중의 잔류 진동 감소를 위한 임펄스의 시간 t_2와 t_3를 다음과 같은 수학식으로 계산하며, 상기와 같은 방법으로 유연시스템의 운동 후의 잔류 진동 감소를 위한 임펄스의 시간 t_5와 t_6를 다음과 같은 수학식으로 구하여,

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

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

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

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

상기 t_2, t_3, t_5 및 t_6를 가속도가 제한된 상기 유연시스템의 운동을 위한 입력 커맨드에 활용하여 잔류 진동을 감소하도록 한 것을 특징으로 하는 가속도 제한된 유연시스템에 대한 강건 입력성형 제어방법.

청구항 2

제1항에 있어서,

상기 벡터 $\overrightarrow{V_1}$, $\overrightarrow{V_2}$, $\overrightarrow{V_3}$는 임펄스로 인한 pendulum에 정상상태 응답에 대한 변위의 크기와 위상각을 나타내는 다음의 벡터,

$$\overrightarrow{V_i}=\left|\frac{2\kappa_i \sin\left(\frac{1}{2}\frac{\omega_n V_d A_i}{\kappa_i}\right)}{L\omega_n^2}\right| \angle\left[\omega_n t_i+\frac{1}{2}\frac{\omega_n V_d A_i}{\kappa_i}\right]$$

를 통해 구하는 것을 특징으로 하는 가속도 제한된 유연시스템에 대한 강건 입력성형 제어방법.

청구항 3

제2항에 있어서,

상기 벡터 $\overrightarrow{V_i}$를 통해 구해진 벡터 $\overrightarrow{V_1}$, $\overrightarrow{V_2}$, $\overrightarrow{V_3}$의 크기와 위상각은,

$$\overrightarrow{V_1}=\left|\sin\left(\frac{1}{8}\frac{\omega_n V_d}{\kappa_a}\right)\right| \angle[0]$$

$$\overrightarrow{V_2}=\left|\sin\left(\frac{1}{4}\frac{\omega_n V_d}{\kappa_a}\right)\right| \angle\left[\omega_n t_2+\frac{1}{8}\frac{\omega_n V_d}{\kappa_a}\right]$$

$$\overrightarrow{V_3}=\left|\sin\left(\frac{1}{8}\frac{\omega_n V_d}{\kappa_a}\right)\right| \angle[\omega_n t_3]$$

인 것을 특징으로 하는 가속도 제한된 유연시스템에 대한 강건 입력성형 제어방법.

청구항 4

제1항 내지 제3항에 있어서,

상기 t_2, t_3, t_5 및 t_6를 나타내는 t_i가 항상 실수값을 가지도록 상기 t_3, t_6의 식에서 $\cos^{-1}$ 항은 -1과 1 사이의 값을 가지도록 한 것을 특징으로 하는 가속도 제한된 유연시스템에 대한 강건 입력성형 제어방법.

청구항 5

제1항 내지 제3항에 있어서,

다음의 수학식,

$$t_{i+1}-t_i \geq \frac{V_d A_i}{\kappa_i} \quad (\kappa_i \text{는} A_i \text{가 양수일 때} \kappa_a, \text{음수일 때} \kappa_d)$$

에 의해 임펄스의 간격이 원하는 속도에서 가속도(속도 감소시에는 감속도)로 나눈 값보다 크도록 한 것을 특징으로 하는 가속도 제한된 유연시스템에 대한 강건 입력성형 제어방법.

발명의 설명

기 술 분 야

[0001] 본 발명은 가속도 제한된 유연시스템에 대한 강건 입력성형 제어방법에 관한 것으로서, 상세히는 기존의 linear 기반의 입력성형제어 방법을 활용할 때 도면 6 과같이 가속도제한 구동기를 거치면서 명령이 ramp형태로 왜곡되는 현상이 나타나며 이에 따라 시스템의 잔류변위의 저감성능이 감소한다. 이와 같은 문제 해결을 위해 상기 유연시스템의 운동에 따른 벡터를 이용하여 잔류변위의 감소를 위한 임펄스 시간을 계산하고, 이를 상기 유연시스템의 운동을 위한 입력 커맨드에 활용하도록 한 가속도 제한된 유연시스템에 대한 강건 입력성형제어 방법에 관한 것이다.

배 경 기 술

[0002] 산업 현장에서 이동과 위치에 관한 제어는 작업 효율을 높일 수 있고 안전성을 확보할 수 있어 상당히 중요하다. 이러한 측면에서 입력성형방법은 이동과 이동이 끝난 직후의 변위를 저감하기에 매우 효과적인 방법이다. 하지만 산업현장의 경우 외부적인 요소들로 인하여 시스템의 변수 추정에 어려움이 있으며 이에 따라 잔류변위 저감의 성능 감소가 일어난다. 또한 구동모터는 대부분 모터 드라이브나 모터 자체의 성능으로 인하여 최대 가속도가 제한되어 있는 경우가 많다. 따라서 이동시에 최대 가속도나 모터 드라이브의 세팅으로 인한 제한된 가속도는 ramp형태의 속도 프로파일을 보이기 때문에 기존의 이론적인 square 형태의 속도 프로파일을 이용한 입력성형방법의 경우 잔류변위가 발생하고, 또한 정밀한 제어가 어려워지기 때문에 실제 산업 현장에서는 입력 성형시에 구동기의 가속도 제한을 고려함과 동시에 강건한 입력성형방법이 요구된다.

[0003] 산업 현장의 입력 성형방법들은 설계변수에 대하여 강건성을 요구하게 되었으며 그에 관한 연구들이 진행되어 왔다. 고유 주파수의 오차에 대한 강건성을 위하여 Singer는 기존의 임펄스 두 개를 이용한 Zero Vibration(ZV) 입력성형기의 고유 주파수를 미분한 식을 이용한 임펄스 3개 형태의 Zero Vibration Derivate(ZVD) 입력성형기를 개발 하였다. 하지만 이 솔루션의 경우 역시 linear system 이론을 기반으로 하고 있어 실제의 산업현장에서는 성능 감소가 일어난다.

[0004] 시스템의 비선형성 역시 산업현장의 잔류변위 감소 성능 향상 및 정확도 향상을 위해 몇몇의 연구가에 의해 연구되고 있다. Sorenson은 saturation, backlash, rate limiting, dead zone의 비선형성으로 인한 입력성형기의 성능감소에 대하여 convolution 방법을 이용한 입력성형기의 성능분석방법을 제시하였다. Kinceler와 Meckl는 비선형시스템(예, robot manipulator)의 point-to-point motion을 위해 inverse dynamics 및 open-loop optimal formulation을 통해 time-varying 고유 주파수에 대한 입력 커맨드 생성하는 방법을 개발하고, 에너지 소비 및 computational burden을 평가하였으며, 매개변수 불확정성에 대한 제어성능 저감으로 매개변수 평가의 필요성을 언급하였다.

[0005] Gorinevsky와 Vukovich는 nonlinear dynamics으로 표시되는 회전 우주 유연구조물의 잔류변위를 저감하기 위해 collocated feedback controller와 feedforward control 방법을 동시에 활용하는 제어방법을 제시하였다. 여기서, feedforward control command는 spline 함수를 활용한 iterative optimization 방법으로 입력 커맨드를 설계하였다. Danielson은 nonlinear dynamics를 kinematic formulation을 통하여 구한 linearized system에 대해 기존의 입력성형 방법들을 평가하였다.

[0006] 구동기와 관련한 성능저하에 관한 연구들을 제안한 Lawrence는 선형 입력성형제어기에 비선형 구동기의 영향으

로 발생되는 가속도 및 감속도에 의한 시간지연을 고려하여 잔류변위 저감 성능을 개선한 비선형 입력성형제어기를개발 하였다. 산업 현장의 비선형 구동기의 동적특성을 고려한 입력성형제어기 설계에 필요한 정확한 변수가 필요하다. Danielson은 구동기의 가속도 제한을 고려하여 최적화 방법을 제시하였다. 하지만 최적화 방법은 실제 시스템에 적용하는데 계산시간이 많이 걸리기 때문에 실제 적용에는 다소 어려움이 있다.

[0007] 가속도 제한은 실제 산업현장의 구동기는 드라이브에 의해 가속도 및 감속도의 제한을 두고 있으며 일반적인 구동기의 동특성을 가장 간단히 근사화한 형태이다.

선행기술문헌

특허문헌

[0008] (특허문헌 0001) 한국 등록특허공보 제10-0919890호

발명의 내용

해결하려는 과제

[0009] 본 발명은 상기한 바와 같은 제반 문제점을 개선하기 위해 안출된 것으로서, 그 목적은 구동기의 동특성 중 가속도 제한을 고려하여 유연시스템의 정확한 입력성형 제어방법을 제시한 것으로, Pendulum system을 통한 응답식을 통해 phasor 형태의 벡터로 계산하여 나타내고, 이렇게 계산된 phasor vector를 vector diagram approach을 활용하여, 유연시스템의 임펄스 크기와 시간을 구하여 가속도제한으로 인한 ramped step과 convolution을 통해 얻어진 입력 커맨드를 유연시스템에 적용하도록 한 Acceleration Limits Zero Vibration Derivate(ALZVD) 입력성형기의 입력성형 제어방법을 제공함에 있다.

[0010] 다른 목적은 numerical simulation을 통해 입력성형기의 잔류변위와 강건성의 성능평가를 하고, 입력성형기들을 mini-bridge crane을 통한 감도, 잔류변위 실험 결과를 통해 성능 검증을 하도록 한 가속도 제한된 유연시스템에 대한 강건 입력성형 제어방법을 제공함에 있다.

과제의 해결 수단

[0011] 상기한 바와 같은 목적을 달성하기 위해 본 발명의 가속도 제한된 유연시스템에 대한 강건 입력성형 제어방법은, 유연시스템의 운동에서 Pendulum System의 전달함수를 이용하여 페이저(phasor) 벡터의 형태로 나타낸 잔류변위에 대한 변위 벡터를 이용한 펄스 시점(t_p)에 따른 각각의 임펄스 A_1과 A_2 및 A_3에 대한 벡터 $\overrightarrow{V_1}$, $\overrightarrow{V_2}$, $\overrightarrow{V_3}$를 구하고, 상기 세 벡터를 이용하여 상기 유연시스템의 운동 중의 잔류 진동 감소를 위한 임펄스의 시간 t_2와 t_3를 다음과 같은 수학식으로 계산하며, 상기와 같은 방법으로 유연시스템의 운동 후의 잔류 진동 감소를 위한 임펄스의 시간 t_5와 t_6를 다음과 같은 수학식으로 구하여,

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

[0012]

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

[0013]

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

[0014]

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

[0015]

[0016] 상기 t_2, t_3, t_5 및 t_6를 가속도가 제한된 상기 유연시스템의 운동을 위한 입력 커맨드에 활용하여 잔류 진동을 감소하도록 한 것을 특징으로 하고 있다.

[0017] 또 상기 벡터 $\overrightarrow{V_1}$, $\overrightarrow{V_2}$, $\overrightarrow{V_3}$는 임펄스로 인한 pendulum에 정상상태 응답에 대한 변위의 크기와 위상각을 나타내는 다음의 벡터,

$$\overrightarrow{V_i}=\left|\frac{2\kappa_i\sin\left(\frac{1}{2}\frac{\omega_n V_d A_i}{\kappa_i}\right)}{L\omega_n^2}\right|\angle\left[\omega_n t_i+\frac{1}{2}\frac{\omega_n V_d A_i}{\kappa_i}\right]$$

[0018]

[0019] 를 통해 구하는 것이 바람직하다.

[0020] 또 상기 벡터 $\overrightarrow{V_i}$를 통해 구해진 벡터 $\overrightarrow{V_1}$, $\overrightarrow{V_2}$, $\overrightarrow{V_3}$의 크기와 위상각은,

$$\overrightarrow{V_1}=\left|\sin\left(\frac{1}{8}\frac{\omega_n V_d}{\kappa_a}\right)\right|\angle[0]$$

[0021]

$$\overrightarrow{V_2}=\left|\sin\left(\frac{1}{4}\frac{\omega_n V_d}{\kappa_a}\right)\right|\angle\left[\omega_n t_2+\frac{1}{8}\frac{\omega_n V_d}{\kappa_a}\right]$$

[0022]

$$\overrightarrow{V_3}=\left|\sin\left(\frac{1}{8}\frac{\omega_n V_d}{\kappa_a}\right)\right|\angle\left[\omega_n t_3\right]$$

[0023]

[0024] 인 것이 바람직하다.

[0025] 또 상기 t_2, t_3, t_5 및 t_6를 나타내는 t_i가 항상 실수값을 가지도록 상기 t_3, t_6의 식에서 $\cos^{-1}$ 항은 -1과 1 사이의 값을 가지도록 하는 것이 바람직하다.

[0026] 또 다음의 수학식,

$$t_{i+1}-t_i \geq \frac{V_d A_i}{\kappa_i} \quad (\kappa_i\text{는 } A_i\text{가 양수일 때 } \kappa_a\text{, 음수일 때 } \kappa_d)$$

[0027]

[0028] 에 의해 임펄스의 간격이 원하는 속도에서 가속도(속도 감소시에는 감속도)로 나눈 값보다 크도록 하는 것이 바람직하다.

발명의 효과

[0029] 본 발명의 가속도 제한된 유연시스템에 대한 강건 입력성형 제어방법에 의하면, 입력성형제어기의 성능 평가를 위해 설계변수에 대한 잔류변위의 크기와 modeling error에 대한 감도를 기존의 linear 기반의 입력성형기와 비교하였을 때 성능 향상을 보였으며, 감도 곡선(sensitivity curve) 역시 기존의 입력성형기보다 modeling error에 강건함을 보여주는 효과가 있다.

[0030] 이로 인해 본 발명의 입력성형 제어방법에 따른 ALZVD 입력성형기는 잔류진도의 감소가 향상되는 효과가 있다.

도면의 간단한 설명

[0031] 도 1은 Flexible System 중의 하나인 Pendulum System의 개념도

도 2는 ZV 입력성형기의 속도의 분리 개념도

도 3은 t_p에서 ZVD 입력성형기의 잔류변위 그래프

도 4는 ZVD Short 커맨드의 convolution process

도 5는 ZVD Long 커맨드의 convolution process

도 6은 ZVD 입력성형기의 왜곡된 커맨드로 인한 시스템 응답

도 7은 본 발명의 입력성형 제어방법에 따른 ALZVD 입력성형기의 속도의 분리 개념도

도 8은 본 발명의 입력성형 제어방법에 따른 ALZVD 입력성형기의 벡터 다이어그램

도 9는 κ_a와 κ_d에서 본 발명의 입력성형 제어방법에 따른 ALZVD 입력성형기의 잔류변위의 컴퓨터 시뮬레이션을 나타내는 도면

도 10은 κ_a와 t_p에서 본 발명의 입력성형 제어방법에 따른 ALZVD 입력성형기의 잔류변위의 컴퓨터 시뮬레이션을 나타내는 도면

도 11은 κ_a와 κ_d에서 본 발명의 입력성형 제어방법에 따른 ALZVD 입력성형기의 감도의 컴퓨터 시뮬레이션을 나타내는 도면

도 12는 κ_a와 L에서 본 발명의 입력성형 제어방법에 따른 ALZVD 입력성형기의 감도의 컴퓨터 시뮬레이션을 나타내는 도면

도 13은 본 발명의 입력성형 제어방법에 따른 ALZVD 입력성형기의 시험대를 위한 Mini-Bridge Crane

도 14는 본 발명의 입력성형 제어방법에 따른 ALZVD 입력성형기에 의한 속도 에러의 실험그래프

도 15는 기존의 ZVD와 본 발명에 따른 ALZVD 입력성형기의 속도 커맨드를 나타내는 그래프

도 16은 기존의 ZVD와 본 발명에 따른 ALZVD 입력성형기의 Deflection Response를 나타내는 그래프

도 17은 L/L_m에서 본 발명의 입력성형 제어방법에 따른 ALZVD 입력성형기의 감도를 나타내는 그래프

도 18은 t_p에서 본 발명의 입력성형 제어방법에 따른 ALZVD 입력성형기의 잔류변위를 나타내는 그래프

도 19는 κ_a/κ_{am}에서 본 발명의 입력성형 제어방법에 따른 ALZVD 입력성형기의 감도를 나타내는 그래프

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0032] 이하, 본 발명에 따른 가속도 제한된 유연시스템에 대한 강건 입력성형 제어방법의 바람직한 실시예를 첨부한 도면을 참조로 하여 상세히 설명한다. 본 발명은 이하에서 개시되는 실시예에 한정되는 것이 아니라 서로 다른 다양한 형태로 구현될 수 있으며, 단지 본 실시예는 본 발명의 개시가 완전하도록 하며 통상의 지식을 가진 자에게 발명의 범주를 완전하게 알려주기 위하여 제공되는 것이다.

[0033] 본 발명에 따른 ALZVD의 입력성형 제어방법에 있어 기본적인 Flexible System 중 하나인 Pendulum System의 전달함수를 이용하여 정상상태 응답을 구하고, 응답을 phasor vector의 형태로 나타내어 잔류변위에 대한 변위 벡터를 나타낸다. 변위벡터는 본 발명의 입력성형 제어방법 따른 입력성형제어기의 설계시에 사용된다.

[0034] 도 1과 같은 일반적인 pendulum의 모델에 대한 식을 Lagrange equation을 이용하여 계산하면 다음의 수학식 1과 같다.

수학식 1

[0035] $$L\ddot{\theta}+g^{*}\sin(\theta)=\ddot{x}\cos(\theta)$$

[0036] 여기서 θ 를 미소각 이라 가정하면 수학식 1은 다음과 같은 수학식 2로 선형화 된다.

수학식 2

$$L\ddot{\theta}+g\theta=u(t)$$

[0037]

[0038] 상기 수학식 1을 라플라스 변환을 통해 응답을 구하면 다음의 수학식 3과 같다. 여기서 가속도 입력 $u(t)$는 속도 입력 $\dot{V}_t(t)$로 나타나며, 라플라스 변환시에 $sV(s)$로 치환된다.

수학식 3

$$\theta(s)=G_p(s).v_t(s)=-\frac{s}{L}\frac{1}{s^2+\omega_n^2}v_t(s)$$

[0039]

[0040] 응답 Θ(s)는 다음의 수학식 4와 같이 시스템 입력 C(s)와 sine input으로 변형된 식으로 나타낸다.

수학식 4

$$\theta(s)=\underbrace{-\frac{v_t(s).s}{L}}_{C(s)}.\underbrace{\frac{1}{s^2+\omega_n^2}}_{Sine\ input}$$

[0041]

[0042] 상기 수학식 4를 steady state response으로 나타내면 다음의 수학식 5로 나타낼 수 있다.

수학식 5

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

[0043]

[0044] 여기서 $v_t(j\omega)$ 는 $j\omega_n$ 만의 함수가 아니고 A_i, t_i 등 여러 변수의 함수지만 간략화 해서 $v_t(j\omega)$ 로 표시한다.

[0045] 벡터의 amplitude 와 phase로 나타내면, 수학식 6으로 나타난다.

수학식 6

$$\rightarrow v = \frac{|v_t(j\omega_n)|}{L} \angle\left(-\frac{\pi}{2} + \angle v_t(j\omega_n)\right)$$

[0046]

[0047] 도 2 (a)의 실제 속도 명령어를 임펄스 시간에 따라 개별적으로 나누면 도 2 (b)와 같다. 따라서 전체 속도명령어에 대한 함수는 다음의 수학식 7과 같이 나타낼 수 있다.

수학식 7

$$v_t(t) = \sum_{i=1}^{n} g_i(t) * H(t - t_i)$$

[0048]

[0049] 여기서 $g_i(t)$ 는 성형된 입력을 도 2와 같이 나누었을 때의 각 부분의 속도의 함수를 의미한다.

[0050] 가속도 제한으로 인한 구동기 함수를 ramp함수로 표시하여 다음의 수학식 8과 같이 나타낼 수 있다.

수학식 8

$$g_i(t) = \kappa_i t - \left(\kappa_i\left(t - \frac{V_d}{\kappa_i}\right) \cdot \delta\left(t - \frac{V_d}{\kappa_i}\right)\right)$$

[0051]

[0052] 여기서 κ_i는 감속도 또는 감속도로 양의 임펄스일 때는 κ_a, 음의 임펄스일 때는 κ_d이다, V_d는 요구되는 속도값이다.

[0053] 상기의 수학식 6과 수학식 8을 이용하여 Laplace transform한 후 벡터의 amplitude와 phase로 나타내면 다음의 수학식 9와 같다.

수학식 9

[0054]
$$\overrightarrow{V_i} = \left| \frac{2\kappa_i \sin\left(\frac{1}{2}\frac{\omega_n V_d A_i}{\kappa_i}\right)}{L\omega_n^2} \right| \angle\left[\omega_n t_i + \frac{1}{2}\frac{\omega_n V_d A_i}{\kappa_i}\right]$$

[0055] 이 벡터는 임펄스로 인한 pendulum에 정상상태 응답에 대한 변위의 크기와 위상각을 나타낸다. 다음의 본 발명의 입력성형 제어방법에 따른 입력성형제어기 개발시에 상기의 수학식 9를 이용한 vector diagram approach를 이용하여 ALZVD(Acceleration Limits Zero Vibration Derivate) 입력성형기를 제시한다.

[0056] 다음은 본 발명에 따른 가속도 제한 입력성형 제어방법에 따른 입력성형기에 대해 설명하도록 한다.

[0057] 기존의 ZVD(Zero Vibration Derivate) 입력성형기의 가속도 제한의 경우 성능 향상을 위해 상기에서 계산된 가속도제한의 phasor vector를 vector diagram approach를 이용하여 exact shapers를 계산한다.

[0058] 기존의 가속도 제한을 고려한 ZVD 입력성형기에 있어, 입력성형기의 명령은 일반적으로 임펄스 시퀀스와 step입력의 convolution을 통해 생성된다. 하지만 이 명령은 pulse duration(t_p)에 따라 short과 long 그리고 interference 커맨드 세 가지로 분류된다. 따라서 세 가지의 커맨드를 구분하고 ZVD 형태의 입력성형기를 개발한다.

[0059] 도 3 은 tp에 따라 ZVD의 잔류변위를 나타내었다. 도 3에 도시한 바와 같이 그래프 상에서 3가지의 구간으로 구분된다. 먼저 I 구간은 short 커맨드 구간으로 실제 잔류변위가 발생하지 않고 있다. II 구간은 Interference 커맨드 구간으로 커맨드가 잔류변위를 크게 발생하고 있다. III 구간은 약간의 변위가 발생되고 있으며 다른 구간과 달리 t_p에 따라 주기적인 특성을 보인다는 것이 특징이다.

[0060] 도 4는 ZVD의 short 커맨드를 나타내고 있다. ZVD short 커맨드는 펄스입력과 임펄스 시퀀스의 convolution을 통해 생성되며 세 개의 펄스 형태로 구성된다. 이와 같은 short 커맨드가 사용되기 위해서는 다음의 수학식 10에서 t_p가 다음과 같은 조건을 만족해야한다.

수학식 10

[0061]
$$t_p \le t_2 - \frac{V_d A_1}{\kappa_d} \text{ and } t_p \le t_3 - t_2 - \frac{V_d A_2}{\kappa_d}$$

[0062] ZVD interference 커맨드는 t_p가 short 커맨드와 long 커맨드 사이에 위치할 경우 발생된다. 따라서 ZVD interference 커맨드가 사용되기 위해서는 다음의 수학식 11 및 24에서 t_p가 다음과 같은 조건을 만족해야한다.

수학식 11

$$t_p \geq t_2 - \frac{V_d A_1}{\kappa_d} \text{ and } t_p \geq t_3 - t_2 - \frac{V_d A_2}{\kappa_d}$$

[0063]

수학식 24

$$t_p \leq t_3 + \frac{V_d A_3}{\kappa_a}$$

[0064]

[0065] ZVD interference 커맨드는 커맨드가 정상상태에 도달하지 않기 때문에 실제 약간의 잔류 변위를 발생시킨다.

[0066] 도 5는 ZVD의 long 커맨드를 나타내고 있다. ZVD long 커맨드는 ramp up과 ramp down에 따라 각기 다른 펄스입력과 임펄스 시퀀스의 convolution을 통해 생성된다. 이와 같은 long 커맨드가 사용되기 위해서는 다음의 수학식 12에서 t_p가 다음과 같은 조건을 만족해야한다.

수학식 12

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

[0067]

[0068] 다음은 본 발명의 입력성형 제어방법에 따른 ALZVD 입력성형기에 대해서 설명한다.

[0069] 기존의 ZVD 입력성형기를 가속도 제한이 고려된 solution으로 제시한다. 도 6은 기존의 linear 기반의 ZVD 입력성형기를 활용할 때 가속도제한 구동기를 거치면서 명령이 ramp형태로 왜곡 되는 현상이 나타나며 이에 따라 시스템의 잔류변위가 발생하고 있음을 보여준다.

[0070] 본 발명에서는 가속도제한 및 강건성을 고려한 입력성형제어방법, 즉, 임펄스 크기에 따른 시간을 결정한다. t_1을 0, 그리고 ZVD 입력성형기와 같은 임펄스 크기를 갖도록 A_1과 A_3를 0.25, A_2를 0.5 로 정한다. 도 7 (a)의 실제 속도 명령어를 임펄스 시간에 따라 개별적으로 나누면 도 7 (b)와 같다. 따라서 상기의 수학식 9를 이용하여 각각의 임펄스에 대한 phasor 벡터 $\overrightarrow{V_1}$, $\overrightarrow{V_2}$, $\overrightarrow{V_3}$는 다음의 수학식 13 내지 15와 같이 표현된다.

수학식 13

$$\overrightarrow{V_1}=\left|\frac{2\kappa_a \sin\left(\frac{0.25}{2}\frac{\omega_n V_d}{\kappa_a}\right)}{L\omega_n^2}\right|\angle\left[\omega_n t_1+\frac{0.25}{2}\frac{\omega_n V_d}{\kappa_a}\right]$$

[0071]

수학식 14

$$\overrightarrow{V_2}=\left|\frac{2\kappa_a \sin\left(\frac{0.5}{2}\frac{\omega_n V_d}{\kappa_a}\right)}{L\omega_n^2}\right|\angle\left[\omega_n t_2+\frac{0.5}{2}\frac{\omega_n V_d}{\kappa_a}\right]$$

[0072]

수학식 15

$$\overrightarrow{V_3}=\left|\frac{2\kappa_a \sin\left(\frac{0.25}{2}\frac{\omega_n V_d}{\kappa_a}\right)}{L\omega_n^2}\right|\angle\left[\omega_n t_3+\frac{0.25}{2}\frac{\omega_n V_d}{\kappa_a}\right]$$

[0073]

[0074] 위의 두 벡터 $\overrightarrow{V_1}$, $\overrightarrow{V_2}$, $\overrightarrow{V_3}$의 크기와 위상각을 정리하면 다음의 수학식 16 내지 18과 같다.

수학식 16

$$\overrightarrow{V_1}=\left|\sin\left(\frac{1}{8}\frac{\omega_n V_d}{\kappa_a}\right)\right|\angle[0]$$

[0075]

수학식 17

$$\overrightarrow{V_2}=\left|\sin\left(\frac{1}{4}\frac{\omega_n V_d}{\kappa_a}\right)\right|\angle\left[\omega_n t_2+\frac{1}{8}\frac{\omega_n V_d}{\kappa_a}\right]$$

[0076]

수학식 18

$$\overrightarrow{V_3}=\left|\sin\left(\frac{1}{8}\frac{\omega_n V_d}{\kappa_a}\right)\right|\angle[\omega_n t_3]$$

[0077]

[0078] 상기의 세 벡터를 이용하여 도 8과 같이 나타내고 임펄스의 시간 t_2와 t_3를 계산하기 위하여 vector diagram approach에서 코사인 법칙을 활용하여 다음의 수학식 19 및 20에 의해 임펄스의 시간을 결정한다.

수학식 19

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

[0079]

수학식 20

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

[0080]

[0081] 유연시스템의 stop motion의 시작 시간은 t_p에 의해 결정되며 κ_a대신 κ_d를 이용하여 계산하면 된다. 따라서 stop motion의 임펄스의 시간은 다음의 수학식 21 및 22로 얻어진다.

수학식 21

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

[0082]

수학식 22

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

[0083]

[0084] 본 발명의 입력성형 제어방법에 따른 ALZVD 입력성형기의 경우 t_i가 항상 실수값을 가져야 한다. 따라서 $\cos^{-1}$ 항의 괄호가 -1~1 사이의 값을 가져야 한다. 또한 다음의 수학식 23에서와 같이 임펄스의 간격이 원하는 속도에서 가속도(속도 감소시에는 감속도)로 나눈 값보다 커야 된다. 그 이유는 이 조건을 만족하지 못할 경우 속도 프로파일이 원하는 속도까지 도달하지 못하여 커맨드가 정상상태에 도달하지 못한다.

수학식 23

$$t_{i+1} - t_i \geq \frac{V_d A_i}{\kappa_i} \left(\kappa_i\text{는 } A_i\text{가 양수일 때 } \kappa_a\text{, 음수일 때 } \kappa_d\right)$$

[0085]

[0086] 본 발명의 가속도 제한 입력성형 제어방법에 따른 입력성형기의 평가는 다음과 같이 이루어진다.

[0087] MATLAB®을 이용하여 앞에서 개발한 각각의 입력성형기에 대하여 numerical simulation을 진행한다. 본 발명의 입력성형 제어방법에 따른 ALZVD 입력성형기의 시뮬레이션을 통해 기존의 ZVD 입력성형기의 성능 비교를 한다. 시뮬레이션의 기본적인 변수들의 값은 다음과 같은 표 1로 설정하였다.

표 1

[0088] 본 발명의 입력성형 제어방법에 따른 ALZVD 입력성형기의 시스템 배개변수

변수	L	κ_a	κ_d	V_d	t_p
값	0.8m	0.5m/sec^2	1m/sec^2	0.2m/sec	3.5sec

[0089] 상기의 설정된 값은 κ_a와 κ_d의 값이 같을 경우 linear 솔루션과 같은 결과를 가지게 되므로 가속도와 감속도의 값을 서로 다른 값으로 설정하였고, 일반적으로 가속도보다 감속도가 크기 때문에 κ_d를 κ_a보다 작게 나타내었으며, 실제 모터의 가속도와 감속도는 최대 속도의 2배 이상의 값을 가진다. 이 값을 이용한 simulation은 κ_a, κ_d, t_p에 대하여 잔류변위 저감 성능과 설계변수 κ_a, κ_d, L에 대한 강건성을 기존의 linear 기반의 입력성형기와 비교하였다.

[0090] 본 발명의 입력성형 제어방법에 따른 ALZVD 입력성형기를 분석하면 다음과 같다.

[0091] 본 발명의 입력성형 제어방법에 따른 ALZVD 입력성형기의 numerical simulation을 진행한다. 시뮬레이션에 사용된 변수 값은 상기의 표 1과 같이 κ_a=0.5m/s^2, κ_d=1m/s^2, =3.5sec, L=0.8m, =0.2m/s로 설정하였으며 실험에 따라 L, t_p, κ_a를 변경하면서 평가를 하였다.

[0092] 도 9는 κ_a와 κ_d에 대하여 본 발명의 ALZVD와 기존의 ZVD 입력성형기의 잔류 변위의 저감 성능을 비교한 그림이다. 변수 설정은 표 1과 동일하며 κ_a와 κ_d의 범위를 0.3~5 m/sec^{2}의 영역에서 진행하였다. 본 발명의 ALZVD 입력성형기의 경우 전체적인 영역에서의 잔류 변위가 0이지만 기존의 ZVD 입력성형기의 경우 잔류변위가 그래프 상에서 0에서 0.73cm정도로 발생한다. κ_a와 κ_d가 같은 값을 가질 경우 기존의 ZVD 입력성형기의 잔류변위가 없어지고 있다. 이는 κ_a와 κ_d가 같을 경우 기존의 ZVD와 본 발명의 ALZVD 입력성형기의 임펄스의 시간이 동일한 값을 갖게 되어 잔류변위가 발생하지 않는다. 또한 기존의 ZVD 입력성형기의 경우 κ_a와 κ_d의 값이 커질수록 잔류변위가 줄어드는 현상을 보인다. 이는 κ_a와 κ_d의 값이 커질수록 linear 구동기와 유사한 구동을 하기 때문에 그 오차가 줄어 잔류변위 자체도 줄어들게 된다.

[0093] 도 10은 κ_a와 t_p에 대하여 본 발명의 ALZVD와 기존의 ZVD 입력성형기의 잔류 변위 나타내고 있다. 변수 설정은 표 1과 동일하며 κ_a 범위를 0.3~5, t_p의 범위를 2~5(sec)로 설정하여 진행하였다. 본 발명의 ALZVD 입력성형기의 경우 전체적인 영역에서의 잔류 변위가 0이지만 기존의 ZVD 입력성형기의 경우 잔류변위가 그래프 상에서 약 0.2~1cm정도로 발생한다. t_p에 따라 기존의 ZVD 입력성형기의 변위가 주기적으로 반복되고 있다. 이는 유연 시스템의 stop motion의 시작 지점의 초기 변위값이 0이 아니므로 t_p값에 따라 잔류변위의 크기가 주기적인 특성을 보인다.

[0094] 도 11은 κ_a와 κ_d에 대하여 본 발명의 ALZVD와 기존의 ZVD 입력성형기의 강건성을 나타내고 있다. 변수 설정은 상기의 표 1과 동일하며 κ_{am}을 0.5, κ_{dm}을 1로 설정하고 진행하였다. 본 발명의 ALZVD 입력성형기의 경우 전체적인 영역에서의 잔류 변위가 약 0.2 이하로 기존의 ZVD 입력성형기보다 낮게 나타나고 있다. 또한 κ_a/κ_{am}와 κ_d/κ_{dm}의 값이 1일 때 잔류 변위의 크기가 0으로 낮게 나타나고 있다. κ_{dm}의 경우 κ_{am}보다 값의 크기가 1로 κ_a보다 크기 때문에 보다 linear 형태에 가까워 잔류변위에 작은 영향을 미치고 있다.

[0095] 도 12는 κ_a와 줄 길이 L에 대하여 본 발명의 ALZVD와 기존의 ZVD 입력성형기의 강건성을 나타내고 있다. 변수 설정은 상기의 표 1과 동일하며 κ_{am}을 0.5, L을 0.8로 설정하고 진행하였다. 본 발명의 ALZVD 입력성형기의 경우 전체적인 영역에서의 잔류 변위가 기존의 ZVD 입력성형기보다 낮게 나타나고 있다. 또한 κ_a/κ_{am}와 κ_d/κ_{dm}의 값이 1일 때 잔류 변위의 크기가 0으로 낮게 나타나고 있다. 이는 가속도 제한 구동기의 경우 본 발명의 ALZVD 입력성형기가 보다 강건함을 나타낸다.

[0096] Simulation을 통해 잔류변위의 크기와 각각의 변수들의 강건성을 평가한 결과 기존의 이상적인 입력성형기와 비교하여 본 발명의 입력성형 제어방법에 따른 입력성형기의 잔류변위가 줄어들고 제어가 가능해졌으며 강건성 역시 증가함을 보인다. 따라서 본 발명의 입력성형 제어방법에 따른 ALZVD 입력성형기가 기존의 ZVD 입력성형기보다 가속도 제한의 경우에 성능이 향상되었다.

[0097] 본 발명의 가속도 제한된 입력성형 제어방법에 따른 입력성형기를 다음과 같이 실험장치를 통해 검증하도록 한다.

[0098] 본 발명의 입력성형 제어방법에 따라 개발된 입력성형제어기들의 잔류변위 저감 성능을 실험적으로 검증하기 위해 도 13의 실험 장치를 사용하였다. mini-bridge crane은 Siemens PLC(programmable logic controller)로 구성되어 있고, 이론 검증을 위해 시스템 구동을 위한 pendant와 실험 data를 입출력할 수 있게 프로그램을 개발하였다. 실험장치의 구동에는 절대 엔코더를 사용하는 3개의 servo motor를 사용하였고 payload의 흔들림을 측정하기 위해 Siemens VS720x 계열의 intelligent vision sensor를 사용하였다.

[0099] 가속도 제한이 고려된 속도 프로파일을 upload를 통해 실험하였으며, upload 하는 속도 프로파일은 ramp 함수를 이용하여 만들고, 이를 motion control할 수 있는 실험장치의 모터 드라이버의 세팅을 모터의 가속도와 감속도를 실험장치의 최대값인 3.6e+008rad/sec로 모터 세팅을 하여 생성된 프로파일을 잘 추적할 수 있도록 하였다.

[0100] 도 14는 실제 ZVD 입력성형기를 이용하여 가속도 제한 속도 프로파일을 입력한 후 입력한 속도 프로파일과 실제 모터의 속도값을 비교하였다. 실제 나타난 error plot의 경우와 같이 최대 $\pm 2cm/sec^2$의 오차는 있으나 명령된 속도 프로파일을 허용범위 안에서 추적하고 있다. intelligent vision sensor를 통해 payload 변위측정을 하였고, MATLAB® software를 통해 측정된 변위를 분석했다. 실험은 $\kappa_a=0.5m/sec^2$, $\kappa_d=1m/sec^2$, $t_p=3.5sec$, $L=0.8m$, $V_d=0.2m/s$로 설정하였으며 start-stop motion을 통해 케이블 길이 또는 t_p을 바꿔가며 잔류변위를 검증하였다.

[0101] 실험 결과는 다음과 같다.

[0102] ramp 형태의 속도 프로파일을 생성하여 mini-bridge crane을 활용해 실험을 진행하였다. 진행시의 변수값은 시뮬레이션과 동일하게 $\kappa_a=0.5m/s^2$, $\kappa_d=1m/s^2$, $t_p=3.5sec$, $L=0.8m$, $V_d=0.2m/s$로 설정하였으며 실험에 따라 L, t_p, κ_a를 변경하면서 실험을 진행하였다.

[0103] 도 15는 실험에 사용된 속도 프로 파일을 나타내고 있다. 실제적으로 커맨드의 임펄스의 크기는 같지만 시간의 차이만 나타난다. 실제 모터의 속도를 나타내기 때문에 이론적인 속도와 비교하여 약간의 오차가 있지만 이론적인 속도의 $\pm 2cm/sec^2$ 이내이다.

[0104] 도 16은 실험을 통해 얻은 Deflection Response를 나타내고 있다. 잔류변위가 약간 발생하는 이유는 이론적으로는 잔류변위가 0의 값을 가지지만 실제 시스템에서의 경우는 외란이나 속도 프로파일의 이론적이 형태로 구동하기는 힘들기 때문이다. 과도 변위의 크기 변화는 거의 차이가 없으나 70%의 잔류변위의 저감의 성능 향상을 보이고 있음을 알 수 있다.

[0105] 도 17은 줄 길이 L에 대한 Modeling error에 대한 감도 곡선이다. 실험변수 값은 $\kappa_a=0.5m/s^2$, $\kappa_d=1m/s^2$, $t_p=3.5sec$, $L=0.8m$, $V_d=0.2m/s$로 설정하였다. 기존의 ZVD 입력성형기는 잔류변위가 발생하고 있다. 하지만 본 발명의 ALZVD 입력성형기의 경우 잔류변위가 0으로 기존의 ZVD 입력성형기보다 강건함을 알 수 있다.

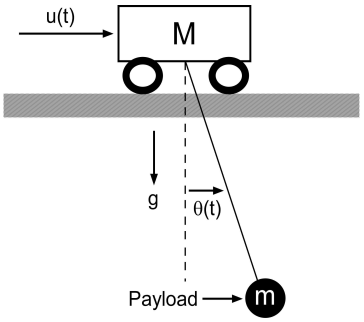
[0106] 도 18은 t_p에 대한 잔류변위를 나타낸다. 실험변수 값은 $\kappa_a=0.5m/s^2$, $\kappa_d=1m/s^2$, $L=0.8m$, $V_d=0.2m/s$로 설정하였다. 기존의 ZVD 입력성형기 역시 잔류변위가 발생하고 있다. 본 발명의 ALZVD 입력성형기는 잔류변위가 0.5cm 이하로 거의 발생하지 않아 기존의 ZVD 입력성형기보다 높은 성능을 보이고 있다.

[0107] 도 19는 가속도 제한의 중요 변수중 하나인 κ_a에 대하여 modeling error에 대한 강건성을 나타낸 것이다. 실험변수 값은 $\kappa_a=0.5m/s^2$, $\kappa_d=1m/s^2$, $t_p=3.5sec$, $L=0.8m$, $V_d=0.2m/s$로 설정하였다. 기존의 ZVD 입력성형기의 경우 잔류변위를 저감 하지 못하고 있으며 본 발명의 ALZVD 입력성형기의 경우는 κ_a/κ_{am}이 1인 경우 잔류변위가 0임을 보이고 있다. 따라서 본 발명의 ALZVD 입력성형기 이상적인 입력성형기보다 κ_a 대해서 강건하다.

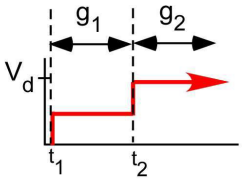
[0108] 이상과 같이 본 발명에 따른 가속도 제한된 유연시스템에 대한 강건 입력성형 제어방법에 대해서 예시한 도면을 참조로 하여 설명하였으나, 본 명세서에 개시된 실시예와 도면에 의해 본 발명이 한정되는 것은 아니며, 본 발명의 기술사상의 범위 내에서 당업자에 의해 다양한 변형이 이루어질 수 있음은 물론이다.

도면

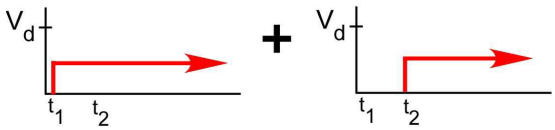
도면1



도면2

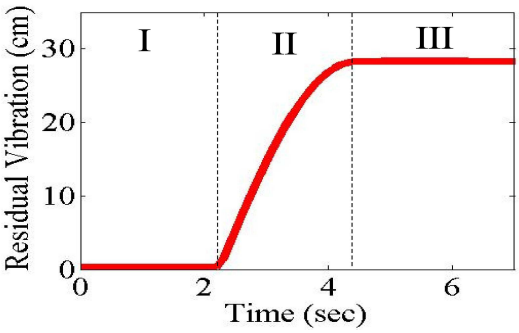


(a)Range Division

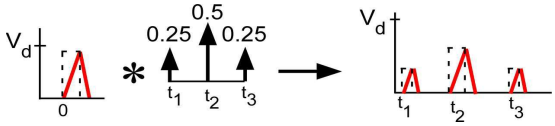


(b)Segmented Profiles

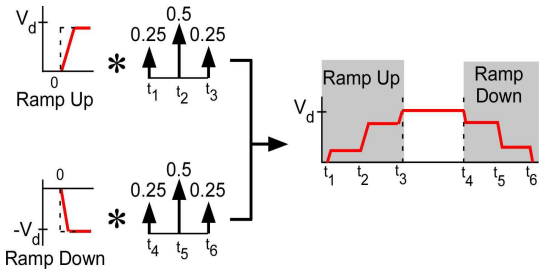
도면3



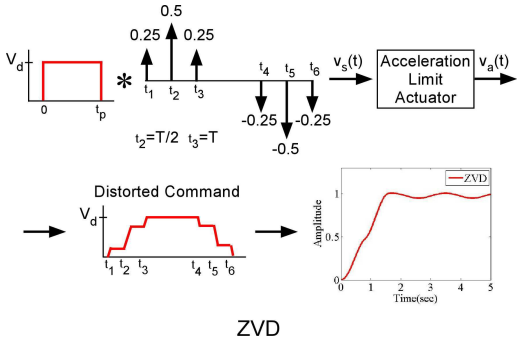
도면4



도면5

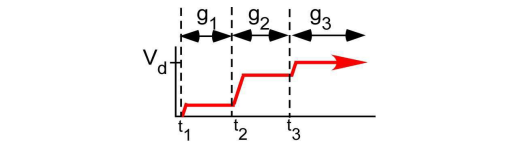


도면6

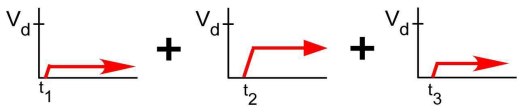


ZVD

도면7

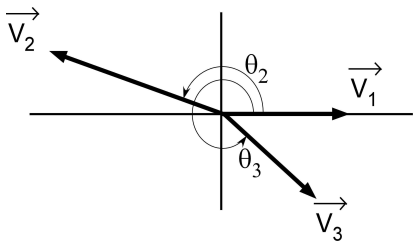


(a)Range Division

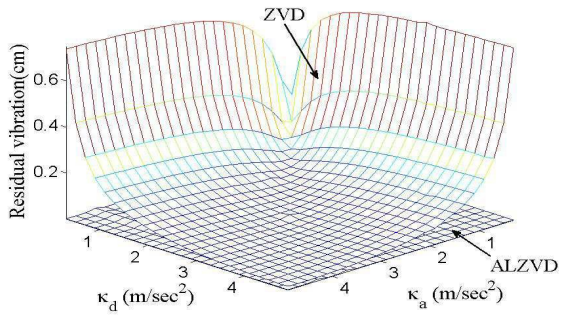


(b)Segmented Profiles

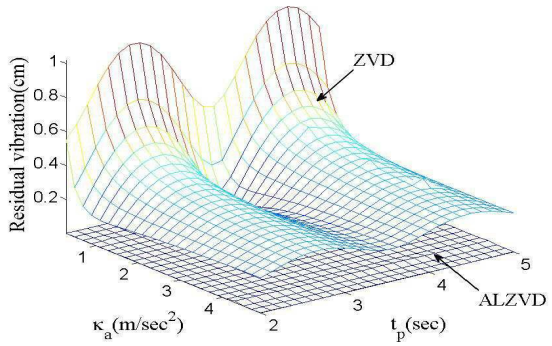
도면8



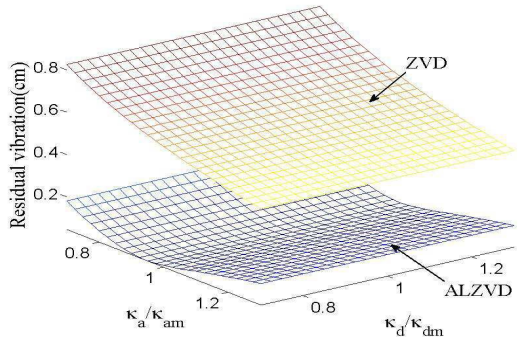
도면9



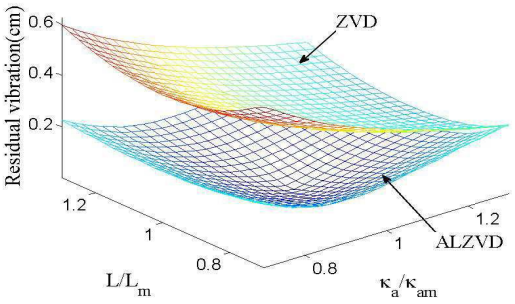
도면10



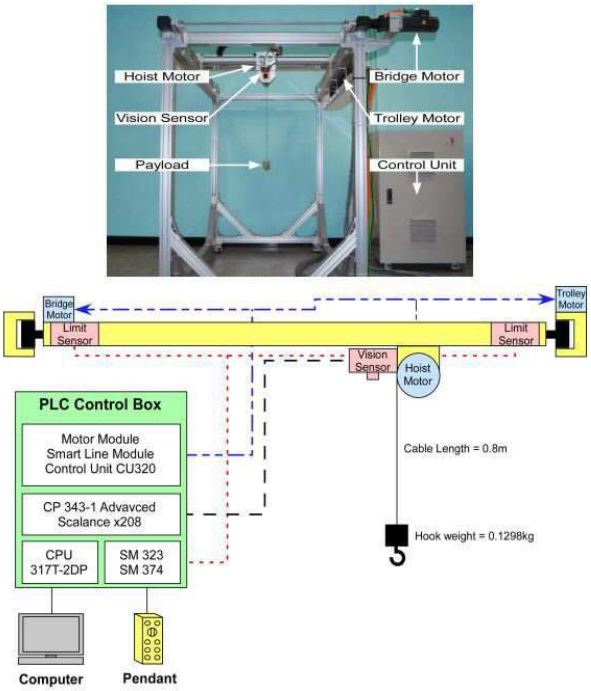
도면11



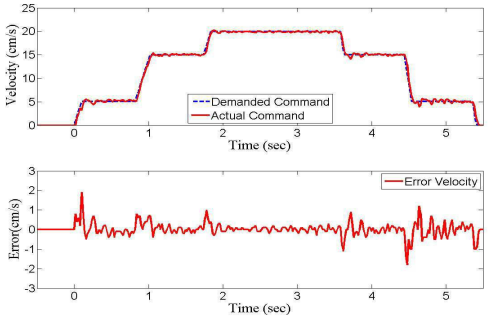
도면12



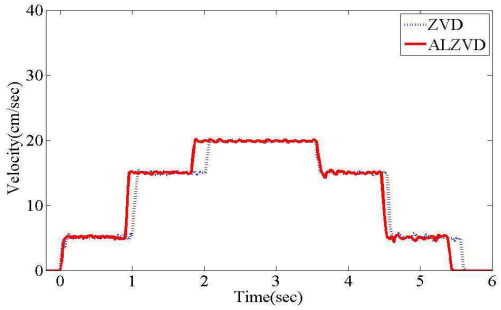
도면13



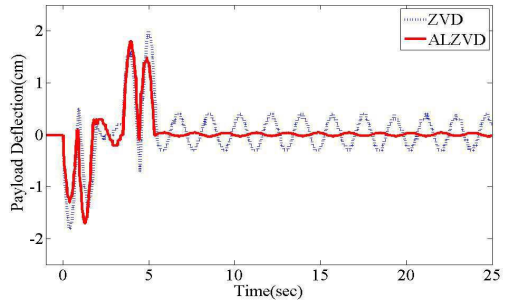
도면14



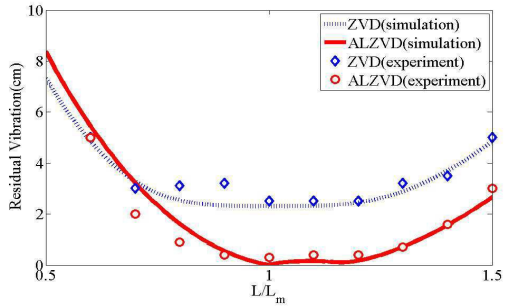
도면15



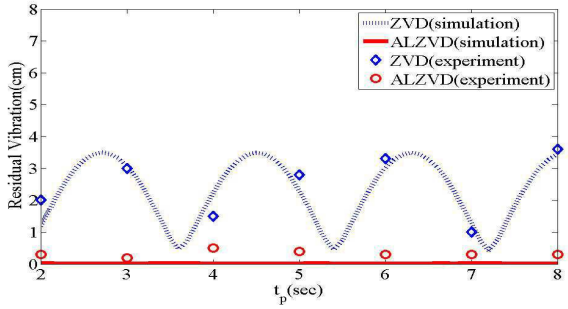
도면16



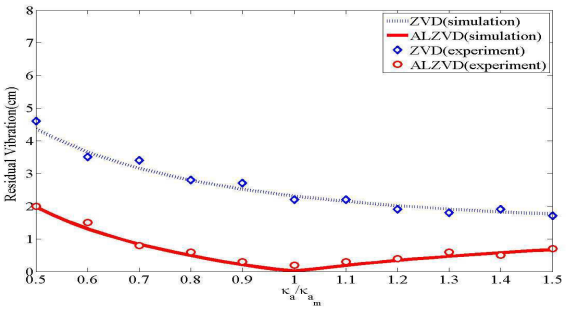
도면17



도면18



도면19


ZVD(simulation)
ALZVD(simulation)
ZVD(experiment)
ALZVD(experiment)
Residual Vibration(cm)
0
1
2
3
4
5
6
7
8
0.5
0.6
0.7
0.8
0.9
1
1.1
1.2
1.3
1.4
1.5
κa/κam