(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2015-0093996
(43) 공개일자 2015년08월19일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G06F 19/00 (2011.01) *F16F 15/02* (2006.01)
G06F 17/10 (2006.01)
(21) 출원번호 10-2014-0014713
(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 6 항

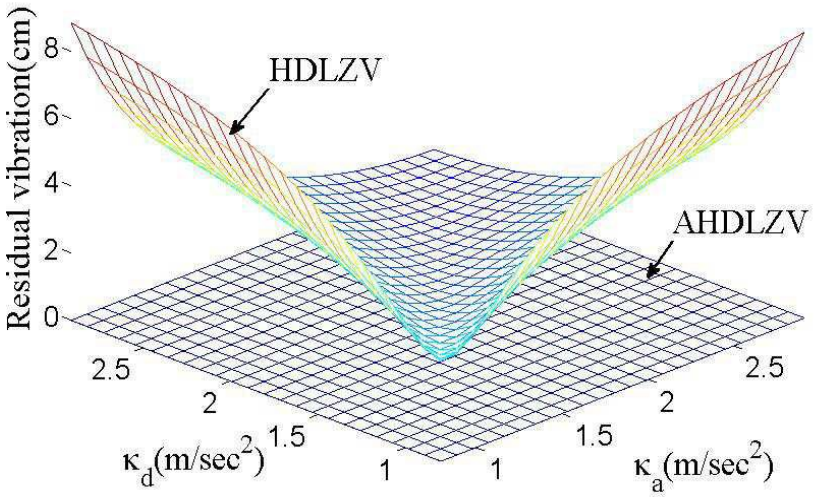
(54) 발명의 명칭 **가속도 및 과도변위 제한된 유연시스템에 대한 고속 입력성형 제어방법**

(57) 요 약

본 발명은 가속도 및 과도변위 제한된 유연시스템에 대한 고속 입력성형 제어방법에 관한 것으로서, 유연시스템의 운동에서 기존의 linear 기반의 입력성형 방법을 활용할 때 도면 6 과같이 가속도제한 구동기를 거치면서 명령이 ramp형태로 왜곡 되는 현상이 나타나며 이에 따라 시스템의 잔류 및 과도변위의 저감성능이 감소한다. 이

(뒷면에 계속)

대 표 도 - 도10



와 같은 문제 해결을 위해 Benchmark System의 운동방정식을 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 구하여, 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 활용하여가속도 및 과도변위가 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 Benchmark System의 운동방정식을 이용하여 페이저(phasor) 벡터의 형태로 나타낸 잔류 변위에 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,

$$t_2=\frac{1}{w_n}\left[\cos^{-1}\left\{\frac{1}{2}\left(\frac{\kappa_d S_1}{\kappa_d S_2}+\frac{\kappa_d S_2}{\kappa_d S_1}-\frac{\kappa_d S_3^2}{\kappa_d S_1 S_2}\right)\right\}-\frac{\omega_n A_1 V_d}{2}\left(\frac{1}{\kappa_d}-\frac{1}{\kappa_a}\right)\right]$$

$$t_3=\frac{1}{w_n}\left[\cos^{-1}\left\{\frac{1}{2}\left(-\frac{S_1}{S_3}-\frac{S_3}{S_1}+\frac{\kappa_d S_2^2}{\kappa_d S_1 S_3}\right)\right\}-\frac{\omega_n V_d}{2}(1-A_1)\right]$$

$$S_1=\sin\left(\frac{\omega_n V_d A_1}{2\kappa_a}\right),\quad S_2=\sin\left(\frac{\omega_n V_d A_1}{2\kappa_d}\right),\quad S_3=\sin\left(\frac{\omega_n V_d}{2\kappa_a}\right)$$

$$t_5=\frac{1}{w_n}\left[\cos^{-1}\left\{\frac{1}{2}\left(\frac{\kappa_d S_4}{\kappa_d S_1}+\frac{\kappa_d S_2}{\kappa_d S_4}-\frac{\kappa_d S_2^2}{\kappa_d S_4 S_1}\right)\right\}-\frac{\omega_n V_d}{2}\left(\frac{A_1}{\kappa_a}-\frac{1}{\kappa_d}\right)\right]\quad t_6=\frac{1}{w_n}\left[\cos^{-1}\left\{\frac{1}{2}\left(-\frac{S_4}{S_2}-\frac{S_2}{S_4}+\frac{\kappa_d S_1^2}{\kappa_d S_2 S_4}\right)\right\}-\frac{\omega_n V_d}{2\kappa_d}(A_1-1)\right]$$

$$S_4=\sin\left(\frac{\omega_n V_d}{2\kappa_d}\right)$$

상기 t_2, t_3, t_5 및 t_6를 가속도 및 과도변위가 제한된 상기 유연시스템의 운동을 위한 입력 커맨드에 활용하여 잔류 진동을 감소하도록 한 것을 특징으로 하는 가속도 및 과도변위가 제한된 유연시스템에 대한 고속 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,

$$\overrightarrow{V_i}=\left|\frac{2\kappa_i \sin\left(\frac{1}{2}\frac{\omega_n V_d A_i}{\kappa_i}\right)}{m_1\omega_n^2}\right| \angle\left[\omega_n t_i+\frac{1}{2}\frac{\omega_n V_d A_i}{\kappa_i}\right]$$

를 통해 구하는 것을 특징으로 하는 가속도 및 과도변위가 제한된 유연시스템에 대한 고속 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,

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

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

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

인 것을 특징으로 하는 가속도 및 과도변위가 제한된 유연시스템에 대한 고속 입력성형 제어방법.

청구항 4

제1항 내지 제3항에 있어서,

상기 t_2, t_3의 식에서 $\cos^{-1}$ 항은 -1과 1 사이인 것을 특징으로 하는 가속도 및 과도변위가 제한된 유연시스템에 대한 고속 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 및 과도변위가 제한된 유연시스템에 대한 고속 입력성형 제어방법.

청구항 6

제1항에 있어서,

상기 t_2, t_3, t_5 및 t_6를 나타내는 t_i는 항상 실수 값을 가지도록 한 것을 특징으로 하는 가속도 및 과도변위가 제한된 유연시스템에 대한 고속 입력성형 제어방법.

발명의 설명

기 술 분 야

[0001] 본 발명은 가속도 및 과도변위 제한된 유연시스템에 대한 고속 입력성형 제어방법에 관한 것으로서, 상세히는 구동기 드라이브로 인한 가속도제한을 갖는 유연시스템의 경우 기존의 linear 기반의 입력성형제어 방법을 활용할 때 도면 6 과같이 가속도제한 구동기를 거치면서 명령이 ramp형태로 왜곡되는 현상이 나타나며 이에 따라 시스템의 잔류 및 과도변위의 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 및 과도변위 제한된 유연시스템에 대한 고속 입력성형제어 방법에 관한 것이다.

배 경 기 술

[0002] 우주구조물 또는 스페이스 셔틀과 같은 유연시스템이 운동을 할 때 구조물의 양쪽 끝단에서는 운동 후 잔류변위와 더불어 운동 중에는 큰 과도변위가 발생된다. 특히 과도변위는 위치제어와 장비의 수명 감소 등에 영향을 주고 있다. 이러한 잔류변위 및 과도변위를 해결하기 위한 방법 중 입력성형기술은 큰 시스템 변화 없이 활용할 수 있는 효과적인 방법 중에 하나이다. 하지만 상기 유연시스템은 구동기 드라이브에 의해 최대 가속도가 고정되어 있기 때문에 ramp형태의 속도 프로파일을 가지게 되어 linear system에 기반한 square 형태의 속도 프로파일을 이용한 입력성형방법의 경우 속도 프로파일 형태의 차이로 인하여 잔류변위가 발생하고 정밀한 제어가 어려워지기 때문에 입력 성형시에 시스템의 따른 제약 조건과 가속도 제한을 고려한 입력성형방법이 요구된다.

[0003] 이러한 요구에 의해 유연시스템의 과도변위를 줄이기 위한 입력성형방법에 대한 연구들이 진행되어 왔다. Singhose, Seering 및 Banerjee는 우주 유연구조물의 slew시에 발생되는 transient deflection의 저감과 연료효율성을 discrete time에서 최적화하는 방법을 이용하여 입력성형기를 제시하였다. 하지만 가속도 제한을 고려한 방법은 아니기 때문에 과도변위와 잔류변위 저감 성능이 감소한다. Robertson과 Singhose는 deflection 벡터 다이어그램을 이용하여 closed form 형태로 나타내었다. 여기서는 deflection의 저감을 벡터 다이어그램을

이용한 방법으로 제시하였지만 이 역시도 가속도 제한은 고려되지 않았다. Singhose, Banerjee와 seering의 robustness, deflecting limiting, 연료 효율성 세 가지를 고려한 방법 등이 있었지만 모두 최적화 방법으로 제시되었다. 하지만 최적화이기 때문에 실제 산업 현장에서 사용하기에는 제약이 있으며 가속도 제한시에 성능 감소가 일어난다. Robertson과 Singhose는 임펄스의 크기 조정을 통한 closed-form 형태의 deflection limiting 방법을 제시하였다. 이 방법은 간단한 방법으로 과도변위를 저감할 수 있는 방법이긴 하지만 가속도 제한 시스템에서는 성능 감소가 일어난다. 이후, Sung과 Singhose가 deflection limiting과 velocity limiting을 고려한 closed form 형태의 deflection-velocity-limiting(DVL)을 개발하였다. 이 방법 역시 linear system 기반의 솔루션이다. 그 밖에 다른 관련 입력성형 기술 역시 linear system theory를 기반으로 하고 있어 가속도가 제한된 시스템에 활용되기에는 어렵고 잔류변위 저감 성능이 떨어진다.

[0004] 비선형 유연시스템의 잔류변위 저감에 활용하기 위한 연구가 초기단계에 있다. Sorenson은 saturation, backlash, rate limiting, dead zone의 비선형성으로 인한 성형기에 성능감소에 대하여 convolution 방법을 이용한 성형기의 성능분석 방법을 제시하였다.

[0005] 구동기와 관련한 비선형성 연구들이 제안되었다. Lawrence는 선형 입력성형제어기에 비선형 구동기의 영향으로 발생되는 가속도 및 감속도에 의한 시간지연을 고려하여 잔류변위저감 성능을 개선한 on-off 형태의 비선형 입력성형제어기를 개발하였다. 이 경우 1st-order형태의 구동기의 비선형을 고려하였으며 산업현장의 비선형 구동기의 동적특성을 고려한 입력성형제어기 설계에 필요한 정확한 변수가 필요하다. Danielson은 구동기의 가속도 제한을 고려하여 최적화 방법을 연구하였다. 하지만 또한 on-off 시스템은 고려하지 않았으며 최적화 방법이기 때문에 계산 과정이 필요하므로 실제 산업 현장에 적용하기에는 다소 어려움이 있다. 그 밖에 다른 비선형을 고려한 입력성형 관련 기술 역시 linear system 이론을 기반으로 하고 있어 가속도가 제한된 시스템에 활용되기에는 어렵고 잔류변위 저감 성능이 떨어진다.

[0006] 현재 가속도 제한을 고려하면서 on-off형태의 솔루션은 아직까지 한 번도 다루어지지 않았다.

선행기술문헌

특허문헌

[0007] (특허문헌 0001) 한국 등록특허공보 제10-0919890호

발명의 내용

해결하려는 과제

[0008] 본 발명은 상기한 바와 같은 제반 문제점을 개선하기 위해 안출된 것으로서, 그 목적은 구동기의 동특성 중 가속도 제한을 고려하여 유연시스템의 과도변위 고속이동 입력성형 제어방법을 제시한 것으로, 2mass-spring system을 통한 응답식을 통해 phasor 형태의 벡터로 계산하여 나타내고, 이렇게 계산된 phasor vector를 vector diagram approach을 활용하여, 상기 유연시스템의 임펄스 크기와 시간을 구하여 가속도제한으로 인한 ramped step과 convolution을 통해 얻어진 입력 커맨드를 유연시스템에 적용하도록 한 Acceleration High-speed Limits Zero Vibration(AHDLZV) 입력성형기의 입력성형 제어방법을 제공함에 있다.

[0009] 다른 목적은 MATLAB®을 이용한 numerical simulation을 통해 입력성형기들의 과도변위와 잔류변위 및 강건성의 성능평가를 하고, 입력성형기들을 mini-bridge crane을 통한 감도, 잔류변위 실험 결과를 통해 성능 검증을 하도록 한 가속도 및 과도변위 제한된 유연시스템에 대한 고속 입력성형 제어방법을 제공함에 있다.

과제의 해결 수단

[0010] 상기한 바와 같은 목적을 달성하기 위해 본 발명의 가속도 및 과도변위 제한된 유연시스템에 대한 고속 입력성형 제어방법은, 유연시스템의 운동에서 Benchmark System의 운동방정식을 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 감

소를 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,

$$t_2=\frac{1}{w_n}\left[\cos^{-1}\left\{\frac{1}{2}\left(\frac{\kappa_d S_1}{\kappa_d S_2}+\frac{\kappa_d S_2}{\kappa_d S_1}-\frac{\kappa_d S_3^2}{\kappa_d S_1 S_2}\right)\right\}-\frac{\omega_n A_1 V_d}{2}\left(\frac{1}{\kappa_d}-\frac{1}{\kappa_a}\right)\right]$$

[0011]

$$t_3=\frac{1}{w_n}\left[\cos^{-1}\left\{\frac{1}{2}\left(-\frac{S_1}{S_3}-\frac{S_3}{S_1}+\frac{\kappa_d S_2^2}{\kappa_d S_1 S_3}\right)\right\}-\frac{\omega_n V_d}{2}(1-A_1)\right]$$

[0012]

$$S_1=\sin\left(\frac{\omega_n V_d A_1}{2\kappa_a}\right),\quad S_2=\sin\left(\frac{\omega_n V_d A_1}{2\kappa_d}\right),\quad S_3=\sin\left(\frac{\omega_n V_d}{2\kappa_a}\right)$$

[0013]

$$t_5=\frac{1}{w_n}\left[\cos^{-1}\left\{\frac{1}{2}\left(\frac{\kappa_d S_4}{\kappa_d S_1}+\frac{\kappa_d S_2}{\kappa_d S_4}-\frac{\kappa_d S_2^2}{\kappa_d S_4 S_1}\right)\right\}-\frac{\omega_n V_d}{2}\left(\frac{A_1}{\kappa_a}-\frac{1}{\kappa_d}\right)\right]\quad t_6=\frac{1}{w_n}\left[\cos^{-1}\left\{\frac{1}{2}\left(-\frac{S_4}{S_2}-\frac{S_2}{S_4}+\frac{\kappa_d S_1^2}{\kappa_d S_2 S_4}\right)\right\}-\frac{\omega_n V_d}{2\kappa_d}(A_1-1)\right]$$

[0014]

$$S_4=\sin\left(\frac{\omega_n V_d}{2\kappa_d}\right)$$

[0015]

[0016] 상기 t_2, t_3, t_5 및 t_6를 가속도 및 과도변위가 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,

[0018] $$\overrightarrow{V_i}=\left|\frac{2\kappa_i \sin\left(\frac{1}{2}\frac{\omega_n V_d A_i}{\kappa_i}\right)}{m_1\omega_n^2}\right|\angle\left[\omega_n t_i+\frac{1}{2}\frac{\omega_n V_d A_i}{\kappa_i}\right]$$

[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,

[0021] $$\overrightarrow{V_1}=|1|\angle[0]$$

[0022] $$\overrightarrow{V_2}=\left|\frac{\sin\left(\frac{-1}{2}\frac{\omega_n V_d A_2}{\kappa_d}\right)}{\sin\left(\frac{1}{2}\frac{\omega_n V_d A_1}{\kappa_a}\right)}\right|\angle\left[\omega_n t_2-\frac{\omega_n V_d}{2}\left(\frac{A_1}{\kappa_d}-\frac{A_1}{\kappa_a}\right)\right]$$

[0023] $$\overrightarrow{V_3}=\left|\frac{\sin\left(\frac{1}{2}\frac{w_n V_d A_3}{\kappa_a}\right)}{\sin\left(\frac{1}{2}\frac{w_n V_d A_1}{\kappa_a}\right)}\right|\angle\left[\omega_n t_3-\frac{\omega_n V_d}{2\kappa_a}(A_1-A_3)\right]$$

[0024] 인 것이 바람직하다.

[0025] 또 상기 t_2, t_3의 식에서 $\cos^{-1}$ 항은 -1과 1 사이인 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 하며, 상기 t_2, t_3, t_5 및 t_6를 나타내는 t_i는 항상 실수 값을 가지도록 하는 것이 바람직하다.

발명의 효과

[0029] 본 발명의 가속도 및 과도변위 제한된 유연시스템에 대한 고속 입력성형 제어방법에 의하면, 입력성형제어기의 성능 평가를 위해 설계 변수에 대한 잔류변위의 크기와 과도변위, modeling error에 대한 감도를 기존의 입력성형기와 비교하였을 때 성능 향상을 보였으며, 감도 곡선(sensitivity curve) 역시 보다 modeling error에 강건함을 보여주는 효과가 있다.

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

도면의 간단한 설명

[0031] 도 1은 Benchmark System의 개념도

도 2는 입력성형기의 속도의 분리 개념도

도 3은 t_p에서 HDLZV 입력성형기의 잔류변위 그래프

도 4는 HDLZV Short 커맨드의 convolution process

도 5는 HDLZV Long 커맨드의 convolution process

도 6은 HDLZV 입력성형기의 왜곡된 커맨드로 인한 시스템 응답

도 7은 본 발명에 따른 AHDLZV 입력성형기의 속도의 분리 개념도

도 8은 본 발명에 따른 AHDLZV 입력성형기의 벡터 다이어그램

도 9는 성형된 가속제한 커맨드 그래프

도 10은 κ_a와 κ_d에서 본 발명의 입력성형 제어방법에 따른 AHDLZV 입력성형기의 잔류변위의 컴퓨터 시뮬레이션을 나타내는 도면

도 11은 κ_a와 t_p에서 본 발명의 입력성형 제어방법에 따른 AHDLZV 입력성형기의 잔류변위의 컴퓨터 시뮬레이션을 나타내는 도면

도 12는 κ_a와 κ_d에서 본 발명의 입력성형 제어방법에 따른 AHDLZV 입력성형기의 감도의 컴퓨터 시뮬레이션을 나타내는 도면

도 13은 κ_a와 κ_d에서 본 발명의 입력성형 제어방법에 따른 AHDLZV 입력성형기의 Transient Deflection의 컴퓨터 시뮬레이션을 나타내는 도면

도 14는 κ_a/κ_{am}에서 본 발명의 입력성형 제어방법에 따른 AHDLZV 입력성형기의 감도를 나타내는 그래프

도 15는 본 발명의 입력성형 제어방법에 따른 AHDLZV 입력성형기의 시험대를 위한 Mini-Bridge Crane

도 16은 본 발명의 입력성형 제어방법에 따른 AHDLZV 입력성형기에 의한 속도 에러의 실험그래프

도 17은 본 발명의 입력성형 제어방법에 따른 AHDLZV 입력성형기의 속도 커맨드를 나타내는 그래프

도 18은 본 발명의 입력성형 제어방법에 따른 AHDLZV 입력성형기의 Deflection Response를 나타내는 그래프

도 19는 L/L_m에서 본 발명의 입력성형 제어방법에 따른 AHDLZV 입력성형기의 감도를 나타내는 그래프

도 20은 t_p에서 본 발명의 입력성형 제어방법에 따른 AHDLZV 입력성형기의 잔류변위를 나타내는 그래프

도 21은 κ_a/κ_{am}에서 본 발명의 입력성형 제어방법에 따른 AHDLZV 입력성형기의 감도를 나타내는 그래프

도 22는 κ_a에서 본 발명의 입력성형 제어방법에 따른 AHDLZV 입력성형기의 Transient Deflection을 나타내는 그래프

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0032] 이하, 본 발명에 따른 가속도 및 과도변위 제한된 유연시스템에 대한 고속 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 AHDLZV의 입력성형 제어방법에 있어 기본적인 Benchmark System의 운동방정식을 이용하여 정상상태 응답을 구하고, 이 응답을 phasor vector의 형태로 나타내어 잔류변위에 대한 변위벡터를 나타낸다. 이 벡터는 본 발명에 따른 AHDLZV의 입력성형 제어방법의 입력성형 설계시에 사용된다.

[0034] 도 1에 도시한 일반적인 Benchmark System의 운동방정식은 다음의 수학식 1 및 수학식 2와 같다.

수학식 1

$$m_1\ddot{x}_1+kx_1-kx_2=u$$

[0035]

수학식 2

$$m_2\ddot{x}_2+kx_2-kx_1=0$$

[0036]

$$Y(s)=X_2(s)-X_1(s)$$

[0037] 위의 시스템 응답을 구하기 위해 라플라스 변환하여 에 대하여 위의 두 식을 정리하여

$$\omega_n^2=(m_1+m_2)k/m_1m_2$$

로 치환하여주면 다음 수학식 3과 같다.

수학식 3

$$Y(s)=-\frac{1}{m_1}\frac{sV(s)}{s^2+\omega_n^2}$$

[0038]

[0039] 여기서 가속도 입력 $u(t)$ 는 속도 입력 $\dot{V}_t(t)$ 로 나타나며 라플라스 변환시 $sV(s)$ 로 치환된다.

[0040] 응답 Y(s)는 다음의 수학식 4 및 5와 같이 시스템입력 C(s)와 sine input으로 표현된다.

수학식 4

$$Y(s)=-\frac{1}{m_1}\frac{sV(s)}{s^2+\omega_n^2}$$

[0041]

수학식 5

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

[0042]

[0043] 이를 이용하여 steady state response 으로 나타내면 다음의 수학식 6으로 나타낼 수 있다.

수학식 6

$$Y_{ss}(t)=\frac{|v_a(j\omega_n)|}{m_1}\sin\left(\omega_n t-\frac{\pi}{2}+\angle v_a(j\omega_n)\right)$$

[0044]

[0045] 여기서 $v_t(j\omega_n)$ 는 $j\omega_n$ 만의 함수가 아니고 A_i t_i등 여러 변수의 함수지만 간략화 해서 $v_t(j\omega)$ 로 표시한다.

[0046] 벡터의 amplitude 와 phase로 나타내면, 다음의 수학식 7로 나타난다.

수학식 7

$$\rightarrow v=\frac{|v_t(j\omega_n)|}{m_1}\angle\left[-\frac{\pi}{2}+\angle v_a(j\omega_n)\right]$$

[0047]

[0048] 도 2 (a)의 실제 속도명령어를 임펄스 시간에 따라 개별적으로 나누면 도 2의 (b)와 같다. 따라서 실제 속도명령어를 임펄스 시간에 따라 개별적으로 나누면 전체 속도명령어에 대한 함수는 다음의 수학식 8과 같이 나타낼 수 있다.

수학식 8

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

[0049]

[0050] 여기서 $g_i(t)$ 는 shaped 입력을 도 4의 2번째 그림과 같이 나누었을 때의 각 부분의 속도의 함수를 의미한다.

[0051] 가속도 제한 형태인 ramp함수의 전달 함수는 다음의 수학식 9와 같이 나타낼 수 있다.

수학식 9

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

[0052]

[0053] 여기서 κ_i는 감속도 또는 감속도로 양의 임펄스일 때는 κa, 음의 임펄스일 때는 κd이다.

[0054] 수학식 7과 9를 이용하여 Laplace transform한 후 벡터의 amplitude와 phase로 나타내면 다음의 수학식 10과 같다.

수학식 10

$$\overrightarrow{V_i} = \left| \frac{2\kappa_i \sin\left(\frac{1}{2}\frac{\omega_n V_d A_i}{\kappa_i}\right)}{m_1 \omega_n^2} \right| \angle\left[\omega_n t_i + \frac{1}{2}\frac{\omega_n V_d A_i}{\kappa_i}\right]$$

[0055]

[0056] 이 벡터는 임펄스로 인한 pendulum에 정상상태 응답에 대한 변위의 크기와 위상각을 나타낸다. 다음의 본 발명의 입력성형 제어방법에 따른 AHDLZV 입력성형 기의 개발시에 상기의 수학식 10을 이용하여 vector diagram approach를 이용하여 본 발명의 입력성형 제어방법에 따른 AHDLZV 입력성형기를 제시한다.

[0057] 다음은 본 발명의 가속도 제한 및 과도변위 저감 입력성형 제어방법에 따른 입력성형기의 개발에서 가속도 제한을 고려한 본 발명의 입력성형 제어방법에 따른 AHDLZV 입력성형기에 대해 설명한다.

[0058] 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 HDLZV 형태의 입력성형기를 개발한다.

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

[0060] 도 4는 HDLZV의 short 커맨드를 나타내고 있다. 상기 HDLZV short 커맨드는 펄스입력과 임펄스 시퀀스의 convolution을 통해 생성되며 세 개의 펄스 형태로 구성된다. 이와 같은 short 커맨드가 사용되기 위해서는 t_p가 다음과 같은 수학식 11 조건을 만족해야한다.

수학식 11

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

[0061]

[0062] 상기 HDLZV interference 커맨드는 t_p가 short 커맨드와 long 커맨드 사이에 위치할 경우 발생된다. HDLZV interference 커맨드는 커맨드가 정상상태에 도달하지 않기 때문에 실제 약간의 잔류 변위가 발생된다.

[0063] 도 5는 HDLZV의 long 커맨드를 나타내고 있다. HDLZV long 커맨드는 ramp up과 ramp down에 따라 각기 다른 펄스입력과 임펄스 시퀀스의 convolution을 통해 생성된다. 이와 같은 long 커맨드가 사용되기 위해서는 t_p가 다음과 같은 수학식 12의 조건을 만족해야한다.

수학식 12

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

[0064]

[0065] 본 발명의 입력성형 제어방법에 따른 AHDLZV 입력성형기의 개발에 있어, 기존의 MUMZV 성형기는 A_3에서의 속도가 낮아 원하는 위치까지의 이동시에 시간이 많이 걸린다는 단점이 있다. 이에 따라 A_1, A_2의 값이 A_3보다 낮고 A_3가 1인 HDLZV 입력성형ㄹ기를 가속도를 포함하여 본 발명의 입력성형 제어방법에 따른 AHDLZV 입력성형기를 개발한다. 도 6은 기존의 임펄스와 step 명령의 convolution으로 생성된 HDLZV 입력명령이 가속도 제한 구동기를 거치면서 명령어에 왜곡이 발생되어 입력이 ramp 형태로 변하게 되어 시스템응답에서 잔류변위가 발생하는 것을 보여준다. 앞서 계산된 시스템의 잔류변위에 대한 phasor 벡터를 이용하여, 가속도 및 과도제한을 고려한 입력성형제어방법, 즉, 임펄스크기에 따른 시간을 결정한다. 여기서 우리는 t_1을 0, A_1, A_2와 A_3를 각각 A_1, $-A_1$과 1로 가정한다. 여기서 A_1과 A_2는 크기는 같고 방향이 다른 임펄스 이다.

[0066] 도 7 (a)의 실제 속도명령어를 임펄스 시간에 따라 개별적으로 나누면 도 7 (b)와 같다. 따라서 상기의 수학식 10을 이용하여 각각의 임펄스 A_1과 A_2에 대한 벡터 $\overrightarrow{V_1}$, $\overrightarrow{V_2}$, $\overrightarrow{V_3}$는 다음과 같은 수학식 13 내지 15로 표현된다.

수학식 13

$$\overrightarrow{V_1}=\left|\frac{2\kappa_a \sin\left(\frac{1}{2}\frac{\omega_n A_1 V_d}{\kappa_a}\right)}{m_1\omega_n^2}\right|\angle\left[\omega_n t_1+\frac{1}{2}\frac{\omega_n A_1 V_d}{\kappa_a}\right]$$

[0067]

수학식 14

$$\overrightarrow{V_2}=\left|\frac{2\kappa_d \sin\left(\frac{-1}{2}\frac{\omega_n A_1 V_d}{\kappa_d}\right)}{m_1\omega_n^2}\right|\angle\left[\omega_n t_2-\frac{1}{2}\frac{\omega_n A_1 V_d}{\kappa_d}\right]$$

[0068]

수학식 15

$$\overrightarrow{V_3}=\left|\frac{2\kappa_a \sin\left(\frac{1}{2}\frac{\omega_n V_d}{\kappa_a}\right)}{m_1\omega_n^2}\right|\angle\left[\omega_n t_3+\frac{1}{2}\frac{\omega_n V_d}{\kappa_a}\right]$$

[0069]

[0070] 위의 두 벡터 $\overrightarrow{V_1}$, $\overrightarrow{V_2}$, $\overrightarrow{V_3}$의 크기와 위상각을 정리하면 다음과 같은 수학식 16 내지 18이 된다.

수학식 16

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

[0071]

수학식 17

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

[0072]

수학식 18

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

[0073]

[0074] 위의 세 벡터를 이용하여 임펄스의 시간 t_2와 t_3를 계산하기 위하여 도 8의 vector diagram approach를 활용하여 본 발명에 따른 AHDLZV 입력성형기의 임펄스의 시간을 결정할 수 있다. $a_2=\angle\overrightarrow{V_2}$ 와 $a_3=\angle\overrightarrow{V_3}$ 같다. 여기에 코사인 법칙을 이용하여 다음의 수학식 19와 20을 얻는다.

수학식 19

$$t_2=\frac{1}{W_n}\left[\cos^{-1}\left\{\frac{1}{2}\left(\frac{\kappa_a S_1}{\kappa_a S_2}+\frac{\kappa_a S_2}{\kappa_a S_1}-\frac{\kappa_a S_3^2}{\kappa_a S_1 S_2}\right)\right\}-\frac{\omega_n A_1 V_d}{2}\left(\frac{1}{\kappa_d}-\frac{1}{\kappa_a}\right)\right]$$

[0075]

수학식 20

$$t_3=\frac{1}{w_n}\left[\cos^{-1}\left\{\frac{1}{2}\left(-\frac{S_1}{S_3}-\frac{S_3}{S_1}+\frac{\kappa_d S_2^2}{\kappa_a S_1 S_3}\right)\right\}-\frac{\omega_n V_d}{2}(1-A_1)\right]$$

[0076]

$$S_1=\sin\left(\frac{\omega_n V_d A_1}{2\kappa_a}\right),\quad S_2=\sin\left(\frac{\omega_n V_d A_1}{2\kappa_d}\right),\quad S_3=\sin\left(\frac{\omega_n V_d}{2\kappa_a}\right)$$

[0077]

[0078] 상기의 수학식 19와 20에서 $\cos^{-1}$ 항목은 반드시 -1과 1 사이에 있어야 한다. 그래야만 $\cos^{-1}$ 항목이 실수로 계산이 되어 유연시스템의 운동 중의 잔류변위를 감소하기 위한 임펄스 시간 t_2, t_3를 얻을 수 있다.

[0079] 본 발명에 따른 AHDLZV 입력성형기를 활용한 유연시스템의 stop motion을 갖춘 AHDLZV 입력성형기의 나머지 switching times, 즉 상기 유연시스템의 운동 후의 잔류변위를 감소하기 위한 임펄스 시간은 start motion의 과정과 같은 방법으로 계산 하면 된다. 계산된 t_5와 t_6는 다음의 수학식 21 및 22로 얻어진다.

수학식 21

$$t_5=\frac{1}{w_n}\left[\cos^{-1}\left\{\frac{1}{2}\left(\frac{\kappa_d S_4}{\kappa_4 S_1}+\frac{\kappa_d S_2}{\kappa_a S_4}-\frac{\kappa_d S_2^2}{\kappa_a S_4 S_1}\right)\right\}-\frac{\omega_n V_d}{2}\left(\frac{A_1}{\kappa_a}-\frac{1}{\kappa_d}\right)\right]$$

[0080]

수학식 22

$$t_6=\frac{1}{w_n}\left[\cos^{-1}\left\{\frac{1}{2}\left(-\frac{S_4}{S_2}-\frac{S_2}{S_4}+\frac{\kappa_d S_1^2}{\kappa_d S_2 S_4}\right)\right\}-\frac{\omega_n V_d}{2\kappa_d}(A_1-1)\right]$$

[0081]

$$S_4 = \sin\left(\frac{\omega_n V_d}{2\kappa_d}\right)$$

[0082]

[0083] 유연시스템의 stop motion의 시작 시간은 t_p에 의해 결정되며 따라서 구동기 드라이브를 고려한 zero 잔류변위 솔루션인 본 발명에 따른 AHDLZV 입력성형기의 전체 시퀀스는 상기의 수학식 19, 20, 21 및 22로 표시된다.

[0084] 본 발명에 따른 AHDLZV 입력성형기의 경우 t_i가 항상 실수값을 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 속도프로파일이 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] 만약 상기의 수학식 23을 만족하지 못할 때는 입력성형기의 잔류변위 저감 성능의 감소를 가져온다.

[0087] 다음은 본 발명에 따른 AHDLZV 입력성형기의 과도변위 제약조건에 대해 설명한다.

[0088] 도 9의 성형된 AHDLZV의 속도입력을 이용하여 deflection의 최대값을 계산한다.

[0089] 따라서 deflection의 식을 일반화하여 summation 형태로 나타내면 다음의 수학식 24와 같다.

수학식 24

$$D_i(t) = \sum_{i=1}^{n} \frac{2\kappa_i}{m_1 \omega_n^2} \sin\left(\frac{V_d A_i \omega_n}{2\kappa_i}\right) \sin\left\{\omega_n\left(t - t_i - \frac{V_d A_i}{2\kappa_i}\right)\right\}$$

[0090]

[0091] 여기서 κ_i는 A_i가 양수일 때는 κ_a, 음수일 때는 κ_d이다.

[0092] 위의 수식으로부터 성형된 커맨드가 가질 수 있는 최대의 deflection 값은 다음의 수학식 25와 같다.

수학식 25

$$D_{ShapMax}(t)=\sum_{i=1}^{n}\frac{2\kappa_i}{m_1\omega_n^2}\sin\left(\frac{V_d A_i \omega_n}{2\kappa_i}\right)$$

[0093]

[0094] 과도 변위 제한을 위해 "임의의 원하는 deflection 값인 D_d값보다 $D_{shapmax}$값이 작거나 같다"는 조건식을 도출하면 다음과 같은 수학식 26이 된다.

수학식 26

$$\sum_{i=1}^{n}\frac{2\kappa_i}{m_1\omega_n^2}\sin\left(\frac{V_d A_i \omega_n}{2\kappa_i}\right)\leq D_d$$

[0095]

[0096] 좌변과 우변을 unshap의 최대 deflection 값으로 나누어 deflection의 비율로 나타내면 다음의 수학식 27과 같다.

수학식 27

$$\sum_{i=1}^{n}\frac{\sin\left(\frac{V_d A_i \omega_n}{2\kappa_i}\right)}{\sin\left(\frac{V_d \omega_n}{2\kappa_a}\right)}\leq\frac{\kappa_i}{\kappa_a}\frac{D_d}{D_{\max}}=\frac{\kappa_i}{\kappa_a}D_{\lim}$$

[0097]

[0098] 여기서 κ_i는 A_i가 양수일 때는 κ_a, 음수일 때는 κ_d이다.

[0099] 위의 식을 이용하여 A_1 대한 값을 시스템 변수들을 대입하고 MATLAB®의 fsolve를 이용하여 계산하는 것으로 사용하였다.

[0100] 다음의 본 발명에 따른 가속도 제한 및 과도변위 저감 입력성형제어기의 평가에 대해 설명한다.

[0101] MATLAB®을 이용하여 앞에서 개발한 각각의 입력성형기에 대하여 numerical simulation을 진행 한다. 기존의 HDLZV와 본 발명에 따른 AHDLZV 입력성형기의 성능비교를 한다. 시뮬레이션의 기본적인 변수들의 값은 다음의 표 1과 같이 설정 하였다.

표 1

[0102] 본 발명에 따른 AHDLZV 입력성형기의 시스템 매개변수

변수	m_1	m_2	k	κ_a	κ_d	V_d	t_p
값	1kg	1kg	1N/m	$1m/sec^2$	$1.6m/sec^2$	0.2m/sec	3.5sec

[0103] 위의 설정된 값은 κ_a와 κ_d의 경우 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, 유연시스템의 실제 모터의 가속도와 감속도는 최대 속도의 2배 이상의 값을 가진다. 이 값을 이용한 simulation은 κ_a, κ_d, 그리고 t_p에 대하여 잔류변위 저감 성능과 설계변수 κ_a와 κ_d에 대한 강건성을 기존의 linear 기반의 입력성형기와 비교하였다.

[0104] 다음은 본 발명에 따른 AHDLZV 입력성형기를 분석하도록 한다.

[0105] MATLAB® 이용하여 상기에서 개발한 본 발명에 따른 AHDLZV 입력성형기의 simulation을 진행한다. 시뮬레이션에 사용된 변수 값은 상기의 표 1과 같이 $\kappa_a=1m/s^2$, $\kappa_d=1.6m/s^2$, $t_p=3.5sec$ 그리고 $V_d=0.2m/s$로 설정하였으며 실험에 따라 t_p, κ_a 그리고 κ_d를 변경하면서 실험을 진행 하였다.

[0106] 도 10은 κ_a와 κ_d에 대하여 기존의 HDLZV와 본 발명에 따른 AHDLZV 입력성형기의 잔류변위의 저감 성능을 비교한 그림이다. 변수 설정은 표 1과 동일하며 κ_a와 κ_d의 범위를 0.8~3의 영역에서 진행하였다. 본 발명에 따른 AHDLZV 입력성형기의 경우 전체적인 영역에서의 잔류변위가 0이지만, 기존의 HDLZV 입력성형기의 경우 잔류변위가 그래프 상에서 0~6cm 정도 발생한다. 하지만 본 발명에 따른 AHDLZV 입력성형기의 경우 zero 변위를 보이고 있다.

[0107] 도 11은 κ_a와 t_p에 대하여 기존의 HDLZV와 본 발명에 따른 AHDLZV 입력성형기의 잔류변위의 크기를 나타내고 있다. 변수 설정은 상기의 표 1과 동일하며 κ_a 범위를 0.1~3, t_p의 범위를 2~15(sec)로 설정하여 진행하였다. 본 발명에 따른 AHDLZV 입력성형기의 경우 전체적인 영역에서의 잔류 변위가 0이지만, 기존의 HDLZV 입력성형기의 경우 잔류변위가 그래프 상에서 약 0~11cm정도 발생한다. t_p에 따라 기존의 HDLZV 입력성형기의 변위가 주기적으로 반복되고 있다. 이는 stop motion의 시작 지점의 초기 변위값이 0이 아니므로 t_p값에 따라 잔류변위의 크기가 주기적인 특성을 보인다.

[0108] 도 12는 κ_a와 κ_d에 대하여 기존의 HDLZV와 본 발명에 따른 AHDLZV 입력성형기의 강건성을 나타내고 있다. 변수 설정은 상기의 표 1과 동일하며 κ_{am}을 1, κ_{dm}을 1.6로 설정하고 진행하였다. 본 발명에 따른 AHDLZV 입력성형기의 경우 전체적인 영역에서의 잔류 변위가 기존의 HDLZV 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.

[0109] Simulation을 통해 잔류변위의 크기와 각각의 변수들의 강건성을 평가한 결과 본 발명에 따른 AHDLZV 입력성형기의 경우 기존의 HDLZV 입력성형기와 비교하여 잔류변위가 줄어들었으며 각 설계 변수에 대한 강건성 역시 증가함을 보인다.

[0110] 도 13은 κ_a와 κ_d에 대하여 본 발명에 따른 AHDLZV 입력성형기의 과도변위를 나타내고 있다. 변수 설정은 상기의 표 1과 동일하게 설정하였다. 본 발명에 따른 AHDLZV 입력성형기의 경우 전체적인 영역에서의 과도변위의 크기가 Dlim값에 의해 제어되고 있다. unshape의 과도변위의 80%를 제한했을 경우 80%보다 낮은 과도변위를 보이며 60% 제한일 경우 역시 60% 이하로 제어가 되고 있다. 이는 본 발명에 따른 AHDLZV 입력성형기가 과도변위 저감을 제어하고 있음을 보여준다.

[0111] 도 14는 줄 길이 κ_a에 대하여 본 발명에 따른 AHDLZV의 가속도의 경사의 각도에 따라 unshape일 때의 잔류변위의 백분율을 나타낸 것이다. 허용 잔류변위를 5%로 가정했을 때 기울기 45° ($\kappa_a=1m/sec^2$)을 기준으로 κ_a/κ_{am}의 값이 0.68~1.84의 값을 가질 때 5%의 잔류변위가 발생하였으며, 이것을 기울기로 환산하면 34.2° ~61.4° 의

기울기 범위 안에서 입력성형기를 작동할 경우 잔류 변위의 5% 이내의 값을 얻을 수 있다.

[0112] 다음은 본 발명에 따른 가속도 제한 및 과도변위 저감의 입력성형기를 검증해보도록 한다.

[0113] 먼저 실험장치 설정함에 있어 본 발명의 입력성형 제어방법에 따른 입력성형기의 과도변위 제한 및 잔류변위 저감 성능을 실험적으로 검증하기 위해 도 15의 실험장치를 사용하였다. 도 15에 도시한 mini-bridge crane은 Siemens PLC (programmable logic controller)로 구성되어있고, 이론 검증을 위해 시스템 구동을 위한 pendant와 실험 data의 입출력을 할 수 있게 프로그램을 개발하였다. 실험장치의 구동에는 절대 엔코더를 사용하는 3개의 servo motor를 사용하였고, payload의 흔들림을 측정하기 위해 Siemens VS720x 계열의 intelligent vision sensor를 사용하였다.

[0114] 가속도 제한이 고려된 속도 프로파일을 upload를 통해 실험을 하였으며, upload하는 속도 프로파일은 ramp 함수를 이용하여 만들고, 이를 motion control 할 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. 도 16은 실제 ideal solution으로 가속도 제한 속도 프로파일을 입력한 후 입력한 속도 프로파일과 실제 모터의 속도값을 비교하였다. 실제 나타난 error plot의 경우와 같이 최대 ±2cm/sec^{2}의 오차는 있으나 명령된 속도 프로파일을 허용범위 안에서 추적하고 있다. intelligent vision sensor를 통해 payload 변위측정을 하였고, MATLAB® software을 통해 측정된 변위를 분석하였다. 실험은 다음의 표 2 설정하였으며 start-stop motion을 통해 케이블 길이 또는 t_p을 바꿔가며 잔류변위를 검증하였다.

표 2

[0115] 실험을 위한 시스템 매개변수

변수	L	κ_a	κ_d	V_d	t_p
값	0.8m	1m/sec^2	1.6m/sec^2	0.2m/sec	3.5sec

[0116] 실험결과는 다음과 같다.

[0117] ramp 형태의 속도 프로파일을 생성하여 mini-bridge crane을 활용해 실험을 진행하였다. 진행시의 변수 값은 상기의 표 2와 동일하게 κ_a=1m/s^2, κ_d=1.6m/s^2, t_p=3.5sec, L=0.8m 그리고 V_d=0.2m/s로 설정하였으며 실험에 따라 L, t_p 그리고 κ_a를 변경하면서 실험을 진행하였다.

[0118] 도 17은 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 ㅁ 2cm/sec^2 이내이다.

[0119] 도 18은 실험을 통해 얻은 Deflection Response를 나타내고 있다. 과도변위의 크기 변화는 거의 차이는 없으나 잔류변위의 경우 기존의 HDLZV 입력성형기는 약 3cm 정도의 크기를 보이고 본 발명에 따른 AHDLZV 입력성형기보다 작은 변위가 발생하고 있다.

[0120] 도 19는 줄 길이 L에 대한 Modeling error에 대한 감도 곡선이다. 실험변수 값은 κ_a=0.8m/s^2, κ_d=1.6m/s^2, t_p=3.5sec, L=0.8m 그리고 V_d=0.2m/s로 설정하였다. L/L_m이 1일 때 기존의 HDLZV 입력성형기의 경우 잔류변위가 발생하고 있다. 하지만 본 발명에 따른 AHDLZV 입력성형기의 경우 잔류변위를 0으로 만들고 있다. 이는 본 발명의 AHDLZV 입력성형기가 보다 강건하다는 것을 나타낸다.

[0121] 도 20은 pulse duration t_p에 대한 잔류변위를 나타낸다. 실험변수 값은 κ_a=0.8m/s^2, κ_d=1.6m/s^2, L=0.8m 그리고 V_d=0.2m/s로 설정하였다. 기존의 HDLZV 입력성형기의 경우 변위가 발생 되고 있으며 본 발명에 따른

AHDLZV 입력성형기의 경우 잔류변위를 0으로 나타내고 있다. 또한 ideal solution의 경우 잔류변위가 발생하기 때문에 변위가 주기적인 특성을 보이고 있다.

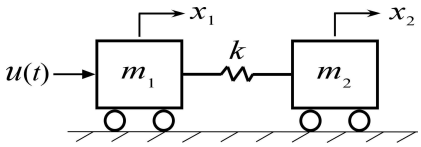
[0122] 도 21은 가속도 제한의 중요 변수중 하나인 κa에 대한 modeling error에 대하여 강건성을 나타낸 것이다. 실험 변수 값은 κ_a=0.8m/s^2, κ_d=1.6m/s^2, [illegible]=3.5sec, L=0.8m 그리고 [illegible]=0.2m/s로 설정하였다. 기존의 HDLZV 입력성형기의 경우 잔류 변위를 저감하지 못하고 있으며 본 발명에 따른 AHDLZV 입력성형기의 경우는 κ_a/κ_{am}이 1인 경우 잔류 변위가 0임을 보이고 있다.

[0123] 도 22는 본 발명에 따른 AHDLZV와 기존의 HDLZV 입력성형기의 κ_a에 대한 과도변위 저감 성능을 나타내고 있다. ideal shaper의 경우 D_{lim}의 값에 따라 과도변위 자체가 저감이 되어 보이지만 입력성형기의 본 목적중 하나인 잔류변위를 없애지 못하는 것을 앞부분에서의 실험과 시뮬레이션을 통해 나타내었으며, D_{lim} 값에 따른 속도입력의 크기가 변하기 때문에 그래프만을 볼 때 과도변위가 저감되어 보인다. 기존의 HDLZV 입력성형기의 경우 κ_a가 약 1~1.4 사이일 때의 그래프를 보면 과도변위가 계속 증가하고 있다. 즉 제대로 제어가 이루어지지 않고 있음을 이야기 하고 있다.

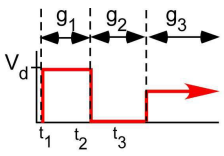
[0124] 이상과 같이 본 발명에 따른 가속도 및 과도변위 제한된 유연시스템에 대한 고속 입력성형 제어방법에 대해서 예시한 도면을 참조로 하여 설명하였으나, 본 명세서에 개시된 실시예와 도면에 의해 본 발명이 한정되는 것은 아니며, 본 발명의 기술사상의 범위 내에서 당업자에 의해 다양한 변형이 이루어질 수 있음은 물론이다.

도면

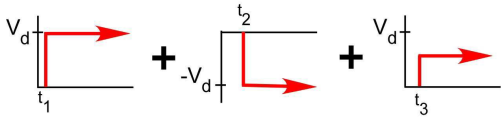
도면1



도면2

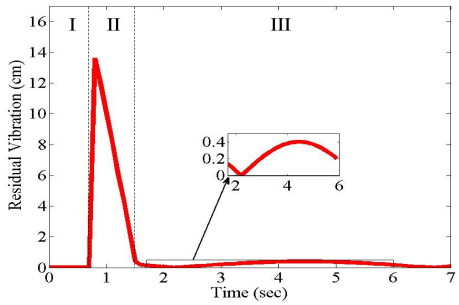


(a)Range Division

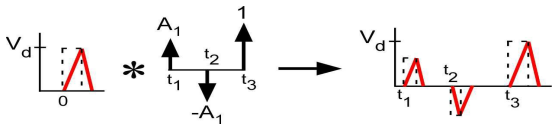


(b)Segmented Profiles

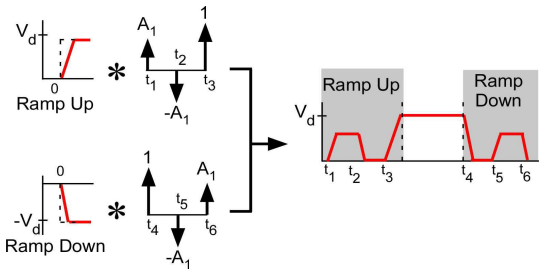
도면3



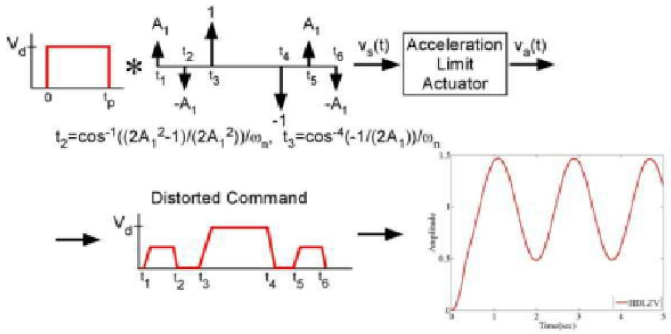
도면4



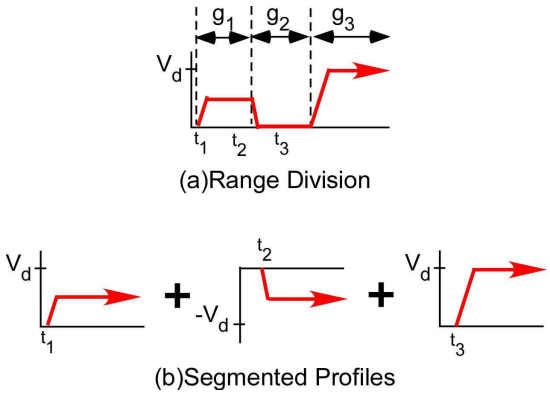
도면5



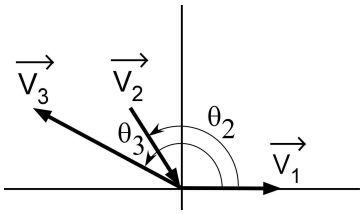
도면6



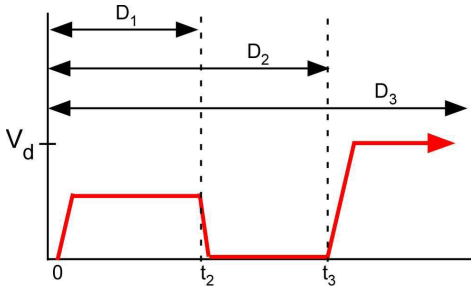
도면7



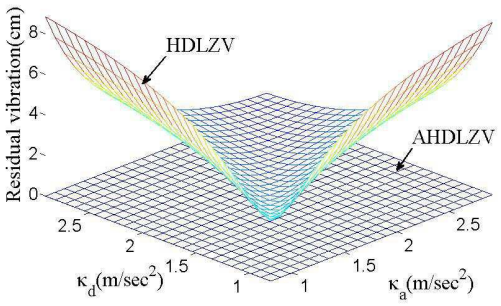
도면8



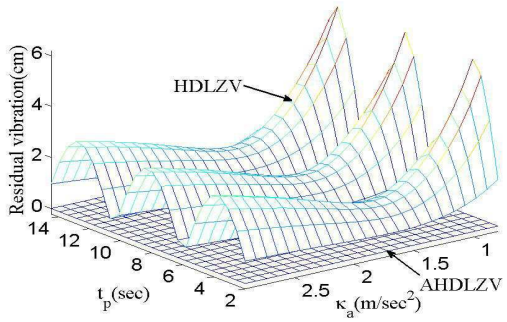
도면9



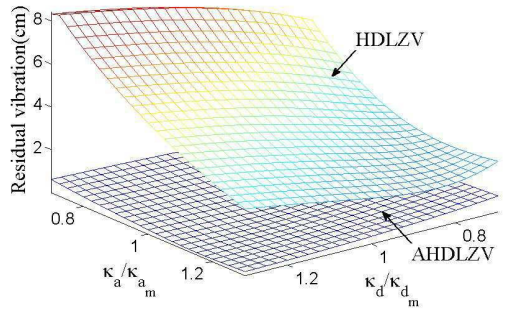
도면10



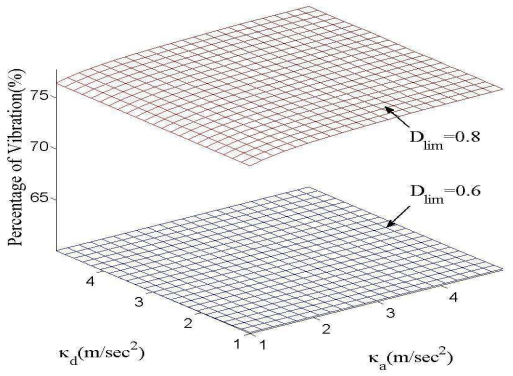
도면11



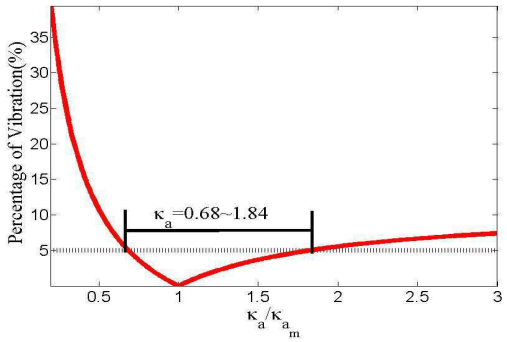
도면12



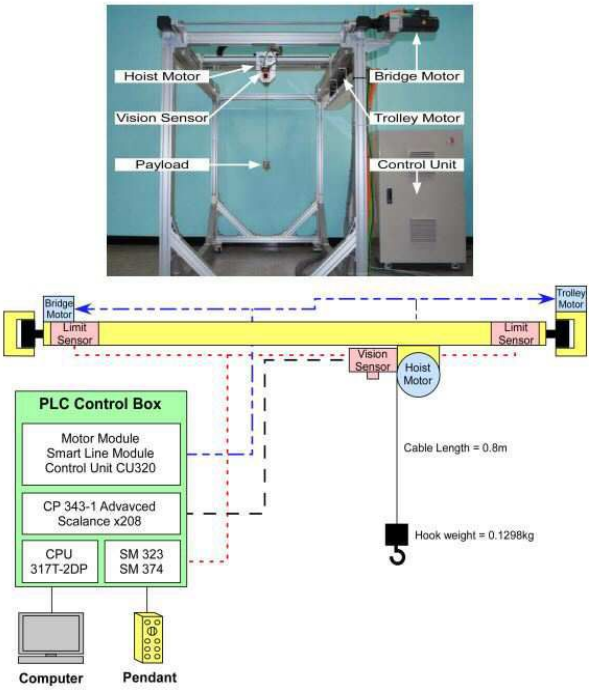
도면13



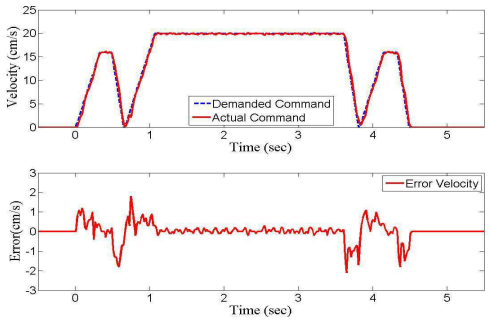
도면14



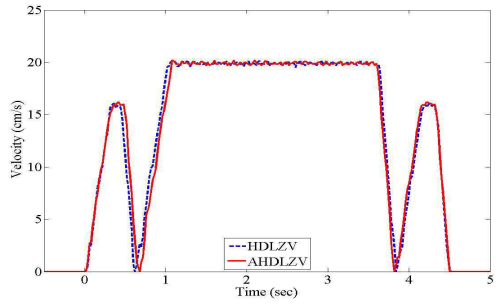
도면15



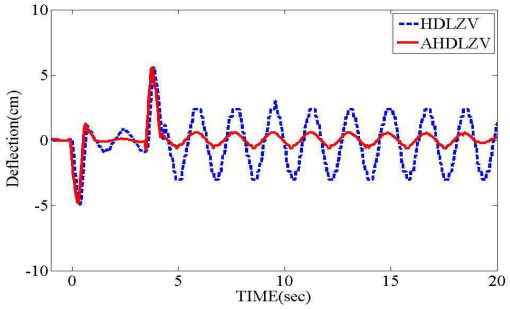
도면16



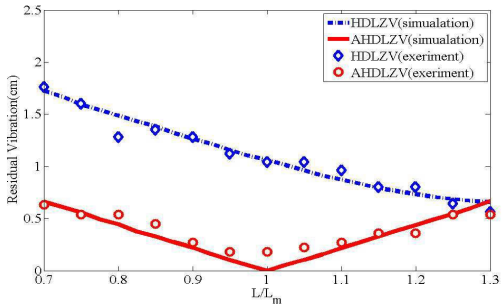
도면17



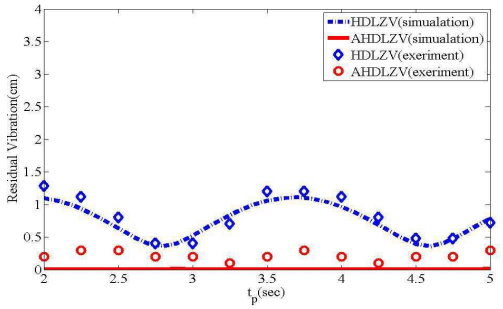
도면18



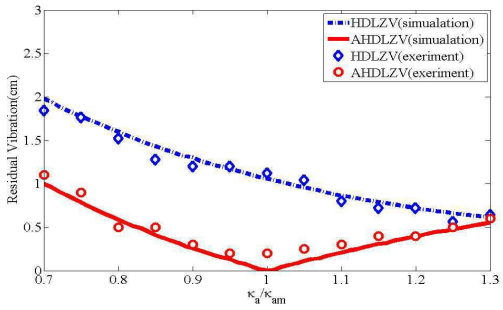
도면19



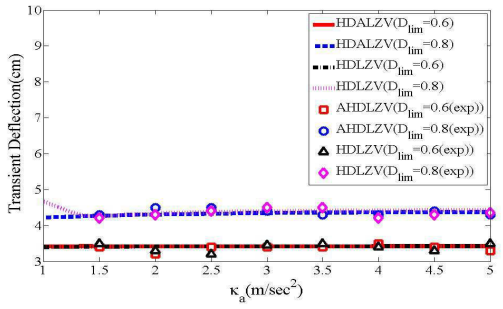
도면20



도면21


HDLZV(simulation)
AHDLZV(simulation)
HDLZV(exeriment)
AHDLZV(exeriment)
Residual Vibration(cm)
κa/κam

도면22


HDALZV(Dlim=0.6)
HDALZV(Dlim=0.8)
HDLZV(Dlim=0.6)
HDLZV(Dlim=0.8)
AHDLZV(Dlim=0.6(exp))
AHDLZV(Dlim=0.8(exp))
HDLZV(Dlim=0.6(exp))
HDLZV(Dlim=0.8(exp))
Transient Deflection(cm)
κa(m/sec2)