



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2014년08월21일
(11) 등록번호 10-1432432
(24) 등록일자 2014년08월13일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
F16F 15/02 (2006.01) F16F 15/00 (2006.01)
G05B 19/00 (2006.01)
(21) 출원번호 10-2013-0021927
(22) 출원일자 2013년02월28일
심사청구일자 2013년02월28일
(56) 선행기술조사문헌
KR1020110087449 A
KR1020090098575 A
JP2000079583 A
JP2003095579 A

(73) 특허권자
조선대학교산학협력단
광주광역시 동구 필문대로 309 (서석동)
(72) 발명자
성윤경
광주광역시 동구 필문대로 309 (서석동)
민윤상
광주광역시 남구 용대로183번안길 5-11 (방림동)
(74) 대리인
특허법인 에이치엠피

전체 청구항 수 : 총 6 항

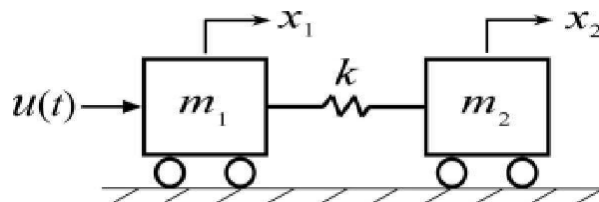
심사관 : 원유철

(54) 발명의 명칭 가속도가 제한된 유연시스템의 과도변위 제한 및 잔류진동 저감을 위한 입력성형 제어기 및 이에 의한 과도변위 제한 및 잔류진동 저감방법

(57) 요약

본 발명은 가속도가 제한된 구동기 드라이브의 유연시스템에서 과도변위 및 잔류진동을 저감하는 입력성형 제어기에 있어서, 일정한 방향성을 갖는 상기 구동기 드라이브의 입력속도($\vec{v}$)와 최대속도 이하의 속도비율(A_3)을 통해 구동기 드라이브의 시작(start) 동작 후 일시 정지시간(t_2), 상기 t_2 후 구동기 드라이브의 가속시간(t_3), 구동기 드라이브의 마침(stop) 동작 후 일시 가속시간(t_5), 상기 t_5 후 구동기 드라이브의 감속시간(t_6)을 구하고, 상기 A_3 에 따른 t_2 , t_3 , t_5 , t_6 의 각 입력성형 신호를 기반으로 생성되는 입력성형 명령(command)을 통해 구동기 드라이브를 제어하여, 가속도가 제한된 유연시스템인 구동기 드라이브의 잔류진동의 저감은 물론 과도변위도 적절하게 제한할 수 있는 효과가 있다.

대표도 - 도1



이 발명을 지원한 국가연구개발사업	
과제고유번호	2012-015464
부처명	교육과학기술부
연구사업명	일반연구자지원사업
연구과제명	비선형 유연시스템의 변위저감을 위한 강건제어기술의 연구
기 여 율	1/2
주관기관	조선대학교 산학협력단
연구기간	2012.05.01 ~ 2015.04.30
이 발명을 지원한 국가연구개발사업	
과제고유번호	2012-C-0023-010108
부처명	교육과학기술부
연구사업명	산학협력 선도대학 육성사업
연구과제명	EV 동력계의 Jerk 저감을 위한 통합제어기술의 개발
기 여 율	1/2
주관기관	조선대학교 산학협력단
연구기간	2012.08.01 ~ 2013.02.28

특허청구의 범위

청구항 1

가속도가 제한된 구동기 드라이브의 유연시스템에서 과도변위 및 잔류진동을 저감하는 입력성형 제어기에 있어서,

일정한 방향성을 갖는 상기 구동기 드라이브의 입력속도($\vec{V}$)와 최대속도 이하의 속도비율(A_3)을 통해 구동기 드라이브의 시작(start) 동작 후 일시 정지시간(t_2), 상기 t_2 후 구동기 드라이브의 가속시간(t_3), 구동기 드라이브의 마침(stop) 동작 후 일시 가속시간(t_5), 상기 t_5 후 구동기 드라이브의 감속시간(t_6)을 구하고,

상기 A_3 에 따른 t_2 , t_3 , t_5 , t_6 의 각 입력성형 신호를 기반으로 생성되는 입력성형 명령(command)을 통해 구동기 드라이브를 제어하는 것을 특징으로 하는 가속도가 제한된 유연시스템의 과도변위 및 잔류진동 저감을 위한 입력성형 제어기 .

청구항 2

가속도가 제한된 구동기 드라이브의 과도변위 제한 및 잔류진동을 저감하는 방법으로서,

상기 구동기 드라이브의 입력속도($\vec{V}$)와 최대속도 이하의 속도비율(A_3)을 통해 식 (a), (b), (c), (d)로부터 구해지는 상기 구동기 드라이브 각각의 제어시간인 입력성형 신호를 생성하는 단계;

$$t_2 = \frac{1}{\omega_n} \left(\cos^{-1} \left(\frac{1}{2} (1 + 4\beta^2 (1 - \frac{\tau_1^2}{4\tau_2^2}) - \frac{1}{2\beta}) \right) - \frac{\omega_n V_f}{2} \left(\frac{1}{\tau_2} - \frac{1}{\tau_1} \right) \right) + nT \quad (a)$$

$$t_3 = \frac{1}{\omega_n} \left(\cos^{-1} \left(\frac{1 + \beta^2 (\frac{\tau_1^2}{\tau_2^2} + 1)}{\sin \left(\frac{\omega_n V_f A_3}{\tau_1} \right)} \right) - \frac{\omega_n V_f}{2\tau_1} (A_3 - 1) \right) + mT \quad (b)$$

$$t_5 = \frac{1}{\omega_n} \left(\cos^{-1} \left(\frac{1}{2} (1 + 4\beta^2 - \frac{\sin(\frac{\omega_n V_f A_3}{\tau_2})}{\sin(\frac{\omega_n V_f A_3}{\tau_1})}) 2\beta \right) - \frac{\omega_n V_f}{2} \left(\frac{1}{\tau_1} - \frac{A_3}{\tau_2} \right) \right) + nT \quad (c)$$

$$t_6 = \frac{1}{\omega_n} \left(\cos^{-1} \left(-\frac{1}{2} (1 + 4\beta^2 (\frac{\tau_1^2}{4\tau_2^2} - 1) - \frac{\sin(\frac{\omega_n V_f A_3}{2\tau_1})}{\sin(\frac{\omega_n V_f}{2\tau_2})}) \right) - \frac{\omega_n V_f}{2} \left(\frac{1}{\tau_1} - \frac{A_3}{\tau_2} \right) \right) + mT \quad (d)$$

상기에서 t_2 는 구동기 드라이브의 시작(start) 동작 후 일시 정지시간, 상기 t_3 는 t_2 후 구동기 드라이브의 가속시간, t_5 는 구동기 드라이브의 마침(stop) 동작 후 일시 가속시간, 상기 t_6 는 t_5 후 구동기 드라이브의 감속시간, A_3 는 구동기 드라이브의 최대속도를 1로 하였을 때 1 이하의 속도비율, 또한 t_4 는 구동기 드라이브의 구동 지속시간, ω_n 은 시스템의 각속도, V_f 는 시스템의 최대속도, β 는 수학식 17의 결과값, τ_1 및 τ_2 는 시스템의 가속도와 감속도, n 은 m 은 시간과 관련된 일반상수, T 는 시스템의 주기,

상기 각 입력성형 신호를 임펄스(impulse) 시퀀스와 중첩(convolution)하여 입력성형 명령(command)을 생성하는

단계; 및

상기 입력성형 명령(command)을 가속도가 제한된 구동기 드라이브에 인가하는 단계;

를 포함하는 것을 특징으로 하는 가속도가 제한된 유연시스템의 입력성형 제어기에 의한 과도변위 및 잔류진동 저감방법.

청구항 3

제2항에 있어서,

상기 식 (a)와 (b)의 $\cos^{-1}$ 항은 -1과 1 사이에 있도록 하는 것을 특징으로 하는 가속도가 제한된 유연시스템의 입력성형 제어기에 의한 과도변위 및 잔류진동 저감방법.

청구항 4

제2항 또는 제3항에 있어서,

상기 구동기 드라이브의 마침(stop) 동작의 시작시간은 $t_p(t_4=\text{구동기 드라이브의 구동 지속시간})$ 에 의해 결정하는 것을 특징으로 하는 가속도가 제한된 유연시스템의 입력성형 제어기에 의한 과도변위 및 잔류진동 저감방법.

청구항 5

제2항 또는 제3항에 있어서,

상기 t_2, t_3, t_5, t_6 를 이용하여 구동기 드라이브의 원하는 이동거리 x_d 를 구하고, 상기 x_d 에 의해 상기 구동기 드라이브의 원하는 이동거리를 이동하는데 걸리는 시간 t_p 를 구하면, 상기 t_p 를 t_4 로 활용하여 구동기 드라이브의 원하는 이동거리 x_d 만큼의 스위치 오프(switch off) 시간을 사용하여, 상기 구동기 드라이브를 원하는 거리 만큼 이동시킬 수 있도록 한 것을 특징으로 하는 가속도가 제한된 유연시스템의 입력성형 제어기에 의한 과도변위 및 잔류진동 저감방법.

청구항 6

제5항에 있어서,

상기 x_d 는 다음의 식,

$$x_d = \frac{1}{2} \left(2(t_2 + t_6) + \frac{2v_f}{\tau_2} - \frac{2v_f}{\tau_1} - 2(t_5) \right) v_f + \frac{1}{2} \left(2t_4 + \frac{v_f A_3}{\tau_2} - \frac{v_f A_3}{\tau_1} - 2t_3 \right) v_f A_3 \quad \text{에 의해 구해지고,}$$

상기 t_p 는 다음의 식,

$$t_p = t_3 + \frac{1}{v_f} \left[x_d - \frac{1}{2} \left(\frac{2 \left(\cos^{-1} \left(\frac{1}{2} \beta \right) - \frac{\omega_n v_f}{2} \left(\frac{1}{\tau_2} - \frac{1}{\tau_1} \right) \right)}{\omega_n} + \frac{v_f}{\tau_2} - \frac{v_f}{\tau_1} \right) v_f \frac{1}{2} \left(\frac{v_f^2}{\tau_2} - \frac{v_f^2}{\tau_1} \right) \right. \\ \left. - \frac{1}{2} \left(\frac{2 \cos^{-1} \left(-1 + \frac{1}{2} \beta^2 \right)}{\omega_n} + \frac{v_f}{\tau_2} - \frac{v_f}{\tau_1} \right) v_f \right. \\ \left. - \frac{2 \left(\cos^{-1} \left(\frac{1}{2} \beta \right) - \frac{\omega_n v_f}{2} \left(\frac{1}{\tau_1} - \frac{1}{\tau_2} \right) \right)}{\omega_n} \right] \right]$$

에 의해 구해지는 것을 특징으로 하는 가속도가 제한된 유연시스템의 입력성형 제어기에 의한 과도변위 및 잔류진동 저감방법.

명세서

기술분야

- [0001] 본 발명은 가속도가 제한된 유연시스템의 과도변위 제한 및 잔류진동 저감을 위한 입력성형 제어기 및 이에 의한 과도변위 제한 및 잔류진동 저감방법에 관한 것으로서, 상세히는 가속도가 제한된 유연시스템으로 구동하는 구동기 드라이브의 입력속도와 최대속도 이하의 속도비율을 통해 상기 구동기 드라이브의 시작(start)과 마칩(stop) 동작에 따른 각 제어시간을 구하고, 이들 각 제어시간을 기반으로 생성된 입력성형 명령(command)에 의해 과도변위 제한 및 잔류진동을 저감하도록 한 가속도가 제한된 유연시스템의 과도변위 제한 및 잔류진동 저감을 위한 입력성형 제어기 및 이에 의한 과도변위 제한 및 잔류진동 저감방법에 관한 것이다.

배경기술

- [0002] 실제 산업현장에서는 구동기 드라이브의 내구성 및 정확성을 위해 과도변위 와 잔류진동을 저감시키는 입력성형 제어기를 활용하고 있다. 하지만 과도변위 및 잔류진동의 저감 성능은 구동기 드라이브의 가속도 제한으로 인하여, 기존의 선형에 기반한 입력성형 방법의 적용시 잔류변위를 발생시키고 과도변위의 저감 성능이 저하된다. 또한 이러한 과도변위의 저감 성능의 저하는 구동기 드라이브의 내구성과 정확성에 영향을 미친다.
- [0003] 즉 실제 산업현장에서 과도변위의 저감이 갖는 의미는 구동기 드라이브의 내구성 및 정확성과 관련된 중요한 요소 중에 하나이다. 또한 구동기 드라이브에 의한 가속도 제한으로 인하여 과도변위 저감 성능을 저하시킨다.
- [0004] 따라서 입력성형 기술은 잔류진동뿐만 아니라 과도변위 제한에도 효과적으로 사용될 수 있다. 이러한 과도변위로 인하여 공장 생산시스템에 사용되는 구동기 드라이브의 경우 내구성에 크게 영향을 미친다. 또한 일반적인 시스템에 사용되는 구동기의 경우 드라이브로 인하여 가속도가 제한되어 있어 일반적인 입력성형 방법의 과도변위 제한 및 잔류진동 저감 성능을 저하시키고 있다. 따라서 구동기 드라이브의 높은 성능과 시스템의 내구성을 위해 과도변위의 제한과 동시에 가속도 제한을 고려한 입력성형 방법이 개발될 필요가 있다.

선행기술문헌

특허문헌

- [0005] (특허문헌 0001) 한국 등록특허공보 제10-1072351호

발명의 내용

해결하려는 과제

- [0006] 본 발명은 상기한 바와 같은 제반 문제점을 개선하기 위해 안출된 것으로서, 그 목적은 가속도를 포함하는 폐쇄형(closed-form) 구동기 드라이브의 과도변위 제한 및 잔류진동을 저감하기 위한 입력성형 제어기에 있어, 가속도 제한에 대한 응답을 근사화하여 phasor 형태의 벡터로 나타내고, 이를 Vector diagram approach을 이용하여 입력성형 방법을 제시하도록, 상기 폐쇄형(closed-form) 구동기 드라이브의 입력속도와 최대속도 이하의 속도비율을 통해 드라이브의 각 제어시간을 구하고, 이들 각 제어시간을 구동기 드라이브에 적용하는 과도변위 제한 및 잔류진동 저감의 입력성형 제어기를 이용하여, 상기 구동기 드라이브의 잔류변위 크기, 강건성을 numerical simulation을 통해 평가 및 검증하며, 제시한 입력성형 방법은 미니 브리지 크레인(mini-bridge crane)을 이용한 실험을 통해 민감도(sensitivity) 및 잔류변위를 평가 및 검증하는 가속도가 제한된 유연시스템의 과도변위 제한 및 잔류진동 저감을 위한 입력성형 제어기를 제공함에 있다.
- [0007] 다른 목적은 구동기 드라이브의 입력속도($\vec{v}$)와 최대속도 이하의 속도비율(A_3)을 통해 구동기 드라이브의 시작(start) 동작 후 일시 정지시간(t_2), 상기 t_2 후 구동기 드라이브의 가속시간(t_3), 구동기 드라이브의 마칩(stop) 동작 후 일시 가속시간(t_5), 상기 t_5 후 구동기 드라이브의 감속시간(t_6)을 식에 의해 구하여 입력성형 신호로 하고, 이러한 입력성형 신호를 기반을 생성된 입력성형 명령(command)을 구동기 드라이브에 적용하여 과도변위 제한 및 잔류진동을 저감하도록 한 가속도가 제한된 유연시스템의 과도변위 제한 및 잔류진동 저감방법을 제공함에 있다.

과제의 해결 수단

[0008] 상기한 바와 같은 목적을 달성하기 위해 가속도가 제한된 유연시스템의 과도변위 제한 및 잔류진동 저감을 위한 입력성형 제어기는, 가속도가 제한된 구동기 드라이브의 유연시스템에서 과도변위 및 잔류진동을 저감하는 입력성형 제어기에 있어서, 일정한 방향성을 갖는 상기 구동기 드라이브의 입력속도($\vec{V}$)와 최대속도 이하의 속도비율(A_3)을 통해 구동기 드라이브의 시작(start) 동작 후 일시 정지시간(t_2), 상기 t_2 후 구동기 드라이브의 가속시간(t_3), 구동기 드라이브의 마침(stop) 동작 후 일시 가속시간(t_5), 상기 t_5 후 구동기 드라이브의 감속시간(t_6)을 구하고, 상기 A_3 에 따른 t_2 , t_3 , t_5 , t_6 의 각 입력성형 신호를 기반으로 생성되는 입력성형 명령(command)을 통해 구동기 드라이브를 제어하는 것을 특징으로 하고 있다.

[0009] 또, 가속도가 제한된 유연시스템의 입력성형 제어기에 의한 과도변위 제한 및 잔류진동 저감방법은, 가속도가 제한된 구동기 드라이브의 과도변위 제한 및 잔류진동을 저감하는 방법으로서, 상기 구동기 드라이브의 입력속도($\vec{V}$)와 최대속도 이하의 속도비율(A_3)을 통해 식 (a), (b), (c), (d)로부터 구해지는 상기 구동기 드라이브 각각의 제어시간인 입력성형 신호를 생성하는 단계;

$$t_2 = \frac{1}{w_n} \left(\cos^{-1} \left(\frac{1}{2} \left(1 + 4\beta^2 \left(1 - \frac{\tau_1^2}{4\tau_2^2} \right) \frac{1}{2\beta} \right) \right) - \frac{\omega_n V_f}{2} \left(\frac{1}{\tau_2} - \frac{1}{\tau_1} \right) \right) + nT \quad (a)$$

$$t_3 = \frac{1}{w_n} \left(\cos^{-1} \left(\frac{1 + \beta^2 \left(\frac{\tau_1^2}{\tau_2^2} + 1 \right)}{\sin \left(\frac{\omega_n V_f A_3}{\tau_1} \right)} \right) - \frac{\omega_n V_f}{2\tau_1} (A_3 - 1) \right) + mT \quad (b)$$

$$t_5 = \frac{1}{w_n} \left(\cos^{-1} \left(\frac{1}{2} \left(1 + 4\beta^2 - \frac{\sin \left(\frac{\omega_n V_f A_3}{\tau_2} \right)}{\sin \left(\frac{\omega_n V_f A_3}{\tau_1} \right)} \right) 2\beta \right) - \frac{\omega_n V_f}{2} \left(\frac{1}{\tau_1} - \frac{A_3}{\tau_2} \right) \right) + nT \quad (c)$$

$$t_6 = \frac{1}{w_n} \left(\cos^{-1} \left(-\frac{1}{2} \left(1 + 4\beta^2 \left(\frac{\tau_1^2}{4\tau_2^2} - 1 \right) \frac{\sin \left(\frac{\omega_n V_f A_3}{2\tau_1} \right)}{\sin \left(\frac{\omega_n V_f}{2\tau_2} \right)} \right) - \frac{\omega_n V_f}{2} \left(\frac{1}{\tau_1} - \frac{A_3}{\tau_2} \right) \right) \right) + mT \quad (d)$$

[0014] 상기에서 t_2 는 구동기 드라이브의 시작(start) 동작 후 일시 정지시간, 상기 t_3 는 t_2 후 구동기 드라이브의 가속시간, t_5 는 구동기 드라이브의 마침(stop) 동작 후 일시 가속시간, 상기 t_6 는 t_5 후 구동기 드라이브의 감속시간, A_3 는 구동기 드라이브의 최대속도를 1로 하였을 때 1 이하의 속도비율,

[0015] 상기 각 입력성형 신호를 임펄스(impulse) 시퀀스와 중첩(convolution)하여 입력성형 명령(command)을 생성하는 단계; 및 상기 입력성형 명령(command)을 가속도가 제한된 구동기 드라이브에 인가하는 단계;를 포함하는 것을 특징으로 하고 있다.

[0016] 또, 상기 식 (a)와 (b)의 $\cos^{-1}$ 항은 -1과 1 사이에 있도록 하며, 상기 구동기 드라이브의 마침(stop) 동작의 시작시간은 t_p (t_4 =구동기 드라이브의 구동 지속시간)에 의해 결정하는 것이 바람직하다.

[0017] 또, 상기 t_2 , t_3 , t_5 , t_6 를 이용하여 구동기 드라이브의 원하는 이동거리 x_d 를 구하고, 상기 x_d 에 의해 상기 구동기 드라이브의 원하는 이동거리를 이동하는데 걸리는 시간 t_p 를 구하면, 상기 t_p 를 t_4 로 활용하여 구동기 드라이브의 원하는 이동거리 x_d 만큼의 스위치 오프(switch off) 시간을 사용하여, 상기 구동기 드라이브를 원하는 거

리만큼 이동시킬 수 있도록 하는 것이 바람직하다.

발명의 효과

[0018] 본 발명의 가속도가 제한된 유연시스템의 과도변위 제한 및 잔류진동 저감을 위한 입력성형 제어기 및 이에 의한 과도변위 제한 및 잔류진동 저감방법에 의하면, 상기 입력성형 제어기의 성능 평가를 위해 τ_1 와 t_p 및 τ_1 와 τ_2 에 대한 잔류진동의 크기를 기존의 입력성형(DLV)과 본 발명의 입력성형(DLV_{AL})과 비교하였으며, 비교 결과 실제 과도변위 저감 성능과 잔류진동 저감에서 τ_1 과 τ_2 가 같은 값을 가지는 경우를 제외한 나머지 τ_1 , τ_2 영역에서 약 70% 이상의 성능이 향상되었음을 보였다.

도면의 간단한 설명

[0019] 도 1은 2mass-spring system 모델의 개략도
 도 2는 입력성형(UMZV) 제어기의 속도 프로파일 그래프
 도 3은 벡터 도형
 도 4는 본 발명의 입력성형(DLV_{AL}) 제어기의 임펄스(impulse) 시간 그래프
 도 5는 본 발명의 입력성형(DLV_{AL}) 제어기의 펄스(Pulse) 지속시간 그래프
 도 6은 τ_1/τ_{1m} 및 τ_2/τ_{2m} 의 민감도(Sensitivity) 그래프
 도 7은 ω 와 A_3 의 과도변위(Transient deflection) 비교 그래프
 도 8은 τ_1 및 τ_2 의 잔류진동(Residual vibration) 비교 그래프
 도 9는 τ_1 및 t_p 의 잔류진동(Residual vibration) 비교 그래프
 도 10은 시험대를 위한 미니크레인의 사진 및 작동상태도
 도 11은 실험적인 속도 명령 그래프
 도 12는 실험적인 오차 deflection의 그래프
 도 13은 실험적인 Payload position 그래프
 도 14는 실험적인 민감도(sensitivity) 비교 그래프
 도 15는 t_p 에서의 실험적인 잔류진동 그래프

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0020] 이하, 본 발명에 따른 가속도가 제한된 유연시스템의 과도변위 제한 및 잔류진동 저감을 위한 입력성형 제어기 및 이에 의한 과도변위 제한 및 잔류진동 저감방법의 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.

[0021] 본 발명에 따른 가속도가 제한된 유연시스템의 과도변위 제한 및 잔류진동 저감을 위한 입력성형 제어기 및 이에 의한 과도변위 제한 및 잔류진동 저감방법에 대한 설명은 과도변위 제한 및 잔류진동을 고려한 폐쇄형(closed-form) 입력성형[DLZV(Deflection Limiting Zero Vibration)] 제어기에서 구동기 드라이브의 가속도 제한을 포함하는 입력성형(DLV_{AL})을 설명하도록 한다.

[0022] 즉 유연시스템으로 작동하는 구동기 드라이브의 대표적인 예로써, 2mass-spring system의 과도변위 저감을 위해 가속도 제한 형태의 ramp step에 대한 시스템 모델의 응답식을 통해 phasor 형태로 나타내고, 이를 Vector diagram을 활용하여 상기한 폐쇄형(closed-form) 입력성형[DLZV_{AL}(Deflection Limiting Zero Vibration Accelation Limit)]을 설명하고, matlab을 활용하여 본 발명의 입력성형(DLV_{AL}) 성능을 numerical simulation

을 통해 과도변위 제한 및 잔류진동 저감 성능을 평가하며, 미니 크레인(Mini-crane)을 이용한 실험을 통해 본 발명의 입력성형(DLZV_{AL})의 성능을 검증한다.

[0023] 도 1은 유연시스템의 구동기 드라이브로써 가장 일반적인 one-mode 시스템 중에 하나인 2mass-spring system이다. 상기 시스템의 운동 방정식은 아래의 수학식 1과 같다.

수학식 1

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

[0024]
$$m_2 \ddot{x}_2 + kx_2 - kx_1 = 0$$

[0025] 위의 시스템을 $\dot{X} = AX + Bu$ 의 형태로 나타내면 아래의 수학식 2와 같다.

수학식 2

$$\dot{X} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\frac{k}{m_1} & 0 & \frac{k}{m_1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\frac{k}{m_2} & 0 & \frac{k}{m_2} & 0 \end{bmatrix} X + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{m_1} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u$$

[0026]

[0027] 상기 수학식 1을 행렬형태로 나타내면 다음의 수학식 3과 같다.

수학식 3

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \ddot{X} + \begin{bmatrix} k & -k \\ -k & k \end{bmatrix} X = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} u$$

[0028]
$$X = [x_1 \ x_2]$$

[0029] x_1 과 x_2 는 각각의 질량 m_1 , m_2 에 대한 변위를 나타내며 위의 시스템에서 발생되는 변위는 $y = x_2 - x_1$ 으로 나타낼 수 있다. 입력 $u(t)$ 는 $\dot{V}(t)$ 이다. 위의 수학식 1을 각각 $\ddot{x}_1$, $\ddot{x}_2$ 의 형태로 정리하면 아래의 수학식 4와 같다.

수학식 4

$$\ddot{x}_1 = \frac{1}{m_1} u - \frac{k}{m_1} (x_1 - x_2)$$

[0030]
$$\ddot{x}_2 = \frac{k}{m_2} (x_1 - x_2)$$

[0031] 위의 시스템을 $\dot{X}=AX+Bu$ 의 형태로 나타내면 아래의 수학적식과 같다.

$$\dot{X} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{-k}{m_1} & 0 & \frac{k}{m_1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{-k}{m_2} & 0 & \frac{-k}{m_2} & 0 \end{bmatrix} X + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u$$

[0032]

[0033] 이 시스템의 응답식을 구하기 위해 운동방정식을 이용하여 변위 $Y(s)$ 를 구하면 아래의 수학적식 5와 같이 나타난다.

수학적식 5

$$Y(s) = x_2 - x_1 = -\frac{1}{m_1} V(s) \frac{s}{s^2 + \omega^2}$$

[0034]

[0035] 상기 수학적식 5의 $Y(s)$ 를 역라플라스를 통해 시간에 대한 응답식 $Y(t)$ 를 계산하면 다음과 같은 수학적식 6이 된다.

수학적식 6

$$Y(t) = \frac{V(t)}{m_1} \sin(\omega_n t - \frac{\pi}{2})$$

[0036]

[0037] 위의 수학적식 6의 응답식을 Phasor식으로 나타내면 다음과 같은 수학적식 7이 된다.

수학적식 7

$$\vec{v} = \frac{|v_i(j\omega)|}{m_1} \angle (-\frac{\pi}{2} + \angle v_i(j\omega))$$

[0038]

[0039] 다음은 상기한 바와 같은 과정으로 구해진 two mass-spring system으로 대표되는 유연시스템의 구동기 드라이브의 입력속도($\vec{V}$)와 상기 구동기 드라이브의 최대속도 이하의 속도비율(A_3)를 통해 본 발명의 입력성형(DLZV_{AL}) 제어기에 적용되는 상기 구동기 드라이브의 각 제어시간을 구하는 방법을 설명하도록 한다. 상기 최대속도 이하의 속도비율(A_3)은 사용자가 원하는 값을 정하는 것으로 0~1 사이의 값을 갖게 되며, 1보다 작은 값을 가질수록 과도변위 자체가 줄어든다. 따라서 최대의 속도비율의 의미는 임펄스 시퀀스와 명령을 컨벌루션(convolution)을 통해 생성하므로, 시스템의 구동속도를 1로 보고 상기 A_3 의 값은 최대속도보다 낮은 값을 사용자가 선택하게 되는 것이 최대속도 이하의 속도비율이며, 이로 인해 과도변위가 저감된다.

[0040] 입력성형 방법이란 시스템의 단계별 명령(command)인 각 구동 제어시간과 임펄스(impulse) 시퀀스를 중첩(convolution)하여 입력성형 명령(command)을 생성하여 사용하는 것을 말한다.

[0041] 도 2는 일반적인 입력성형(UMZV) 제어기가 AL Actuator(Acceleration Limit Actuator:가속도 제한 액추에이

터)를 거쳐 생성되는 속도 프로파일을 나타낸다. 시작(start) 동작의 시작 시간인 t_1 은 0이다. 또 마침(stop) 동작의 시작 시간인 t_4 는 스위치 오프(switch off) 시간이며 t_p 라고 한다. 여기서, 일반적인 입력성형이라면 직사각형 모양의 커맨드가 생성되지만, 가속도 제한 액추에이터(AL Actuator)를 거치면서 입력 $v(t)$ 는 Ramp step 함수형태의 속도를 얻는다. 시작(start) 동작을 위한 입력성형(UMZV) 제어기의 실제 속도명령어를 임펄스 시간에 따라 개별적으로 나누면 전체 속도명령어에 대한 함수는 다음의 수학식 8으로 나타낼 수 있다.

수학식 8

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

[0042]

[0043] 상기한 수학식 6을 부분적으로 나타내면 다음의 수학식 9와 수학식 10 및 수학식 11과 같다.

수학식 9

$$g_1(t) = \tau_1 t - (\tau_1 (t - \frac{V_f}{\tau_1}) * \delta(t - \frac{V_f}{\tau_1}))$$

[0044]

수학식 10

$$g_2(t) = \tau_2 t - (\tau_2 (t - \frac{V_f}{\tau_2}) * \delta(t - \frac{V_f}{\tau_2}))$$

[0045]

수학식 11

$$g_3(t) = \tau_1 t - (\tau_1 (t - \frac{V_f \times A_3}{\tau_1}) * \delta(t - \frac{V_f \times A_3}{\tau_1}))$$

[0046]

[0047] 상기한 수학식 7과 수학식 8 및 수학식 9를 각각 Laplace transform하여 다음의 수학식 12와 같이 벡터의

$$s = (j\omega_n)$$

amplitude와 phase로 나타낸다.

수학식 12

$$\vec{V}_1 = \frac{|v_t(j\omega_n)|}{m_1} \angle \left(-\frac{\pi}{2} + \angle v_t(j\omega_n) \right), \quad \angle V_t(j\omega_n) = \tan^{-1} \frac{\text{허수부}}{\text{실수부}}$$

$$\vec{V}_1 = \left| \frac{2\tau_1 \sin\left(\frac{1}{2} \frac{\omega_n V_f}{\tau_1}\right)}{\omega_n^2} \right| \angle \left[\frac{1}{2} \frac{\omega_n V_f}{\tau_1} \right]$$

$$\vec{V}_2 = \left| \frac{2\tau_2 \sin\left(\frac{1}{2} \frac{\omega_n V_f}{\tau_2}\right)}{\omega_n^2} \right| \angle \left[\frac{1}{2} \frac{\omega_n V_f}{\tau_2} \right]$$

$$\vec{V}_3 = \left| \frac{2\tau_1 \sin\left(\frac{1}{2} \frac{\omega_n V_f \times A_3}{\tau_1}\right)}{\omega_n^2} \right| \angle \left[\frac{1}{2} \frac{\omega_n V_f \times A_3}{\tau_1} \right]$$

[0048]

[0049]

위 수학식 12에서 t_1 , t_2 및 t_3 은, 펄스 생성기가 펄스들을 생성하는 시점들이다. 구체적으로, 펄스 생성기는, t_1 에서 + 펄스를 생성하고, t_2 에서 - 펄스를 생성하고, t_3 에서 + 펄스를 생성한다.

[0050]

이하에서, t_1 , t_2 및 t_3 이 결정되는 과정에 대해 상세히 설명한다. 유연시스템에서 잔류진동을 최소화시키기 위해, 도 3에 도시된 바와 같이, V_1 , V_2 및 V_3 의 벡터 합을 "0" 벡터로 설정한다. 여기서, V_1 , V_2 및 V_3 의 벡터 합을 "0" 벡터로 설정한다 함은, V_1 , V_2 및 V_3 의 벡터 합을 최소로 설정함을 의미한다.

[0051]

도 3에서 V_2 의 벡터각은 α_2 이고, V_3 의 벡터각은 α_3 임을 확인할 수 있다.

[0052]

$\vec{V}_1$ 의 크기를 1로 나타내기 위하여 정규화하면 $\vec{V}_1$ 의 amplitude로 3개의 벡터의 amplitude를 나눠주고, 3개의 벡터의 angle에서 $\vec{V}_1$ 의 angle로 빼주어 정규화 하면, 다음의 수학식 13과 수학식 14 및 수학식 15로 표현된다. ($t_1=0$)

수학식 13

$$\vec{V}_1 = 1 \angle [0]$$

[0053]

수학식 14

$$\vec{V}_2 = \left| \frac{\tau_2 \sin\left(\frac{1}{2} \frac{\omega_n V_f}{\tau_2}\right)}{\tau_1 \sin\left(\frac{1}{2} \frac{\omega_n V_f}{\tau_1}\right)} \right| \angle \left[\frac{\omega_n V_f}{2} \left(\frac{1}{\tau_2} - \frac{1}{\tau_1} \right) \right]$$

[0054]

수학식 15

$$\vec{V}_3 = \left| \frac{\tau_1 \sin\left(\frac{1}{2} \frac{\omega_n V_f \times A_3}{\tau_1}\right)}{\tau_1 \sin\left(\frac{1}{2} \frac{\omega_n V_f}{\tau_1}\right)} \right| \angle \left[\frac{\omega_n V_f \times A_3}{2\tau_1} - \frac{\omega_n V_f}{2\tau_1} \right]$$

[0055]

[0056]

도 3의 Vector diagram approach를 활용하여 본 발명의 입력성형(DLZV_{AL})에 적용되는 구동기 드라이브의 각 제어시간을 결정할 수 있다. $\alpha_2 = \angle \vec{V}_2$ 와 $\alpha_3 = \angle \vec{V}_3$ 같다. 여기에 아래의 cosines law를 이용하여 다음의 수학식 16과 수학식 17을 얻는다.

[0057]

$$\vec{V}_3^2 = \vec{V}_1^2 + \vec{V}_2^2 - 2 \vec{V}_1^2 * \vec{V}_2^2 \cos \alpha_2$$

cosines law :

수학식 16

$$t_2 = \frac{1}{\omega_n} \left(\cos^{-1} \left(\frac{1}{2} (1 + 4\beta^2 (1 - \frac{\tau_1^2}{4\tau_2^2})) \frac{1}{2\beta} \right) - \frac{\omega_n V_f}{2} \left(\frac{1}{\tau_2} - \frac{1}{\tau_1} \right) \right) + nT$$

[0058]

수학식 17

$$t_3 = \frac{1}{\omega_n} \left(\cos^{-1} \left(\frac{1 + \beta^2 \left(\frac{\tau_1^2}{\tau_2^2} + 1 \right)}{\sin \left(\frac{\omega_n V_f A_3}{\tau_1} \right)} \right) - \frac{\omega_n V_f}{2\tau_1} (A_3 - 1) \right) + mT$$

$$\beta = \frac{\tau_2 \sin \left(\frac{\omega_n V_f}{2\tau_2} \right)}{\tau_1 \sin \left(\frac{\omega_n V_f}{2\tau_1} \right)}$$

[0059]

[0060] 상기한 수학식 16과 17에서 $\cos^{-1}$ 항은 반드시 -1과 1 사이에 있어야 한다. 그래야만 $\cos^{-1}$ 항이 실수로 계산이 되어 t_2 , t_3 를 얻을 수 있다.

[0061] 본 발명의 입력성형(DLZV_{AL})을 활용한 유연시스템의 마침(stop) 동작을 갖춘 입력성형(DLZV_{AL}) 제어기의 나머지 switching 시간은 시작(start) 동작의 과정과 유사하다. 마침(stop) 동작의 시작시간 $t_4=t_p$ (pulse duration; 펄스 지속시간)으로 나타나며, t_5 와 t_6 는 다음의 수학식 21과 수학식 22의 일반화된 식으로 표시된다.

수학식 18

$$\vec{V}_4 = \left| \frac{2\tau_2 \sin \left(\frac{1}{2} \frac{\omega_n V_f \times A_3}{\tau_1} \right)}{\omega_n^2} \right| \angle \left[\frac{1}{2} \frac{\omega_n V_f \times A_3}{\tau_2} \right]$$

[0062]

수학식 19

$$\vec{V}_5 = \left| \frac{2\tau_1 \sin \left(\frac{1}{2} \frac{\omega_n V_f}{\tau_1} \right)}{\omega_n^2} \right| \angle \left[\frac{1}{2} \frac{\omega_n V_f}{\tau_1} \right]$$

[0063]

수학식 20

$$\vec{V}_6 = \left| \frac{2\tau_2 \sin\left(\frac{1}{2} \frac{\omega_n V_f}{\tau_2}\right)}{\omega_n^2} \right| \angle \left[\frac{1}{2} \frac{\omega_n V_f}{\tau_2} \right]$$

[0064]

수학식 21

$$t_5 = \frac{1}{\omega_n} \left(\cos^{-1} \left(\frac{1}{2} (1 + 4\beta^2 - \frac{\sin\left(\frac{\omega_n V_f A_3}{\tau_2}\right)}{\sin\left(\frac{\omega_n V_f A_3}{\tau_1}\right)}) 2\beta \right) - \frac{\omega_n V_f}{2} \left(\frac{1}{\tau_1} - \frac{A_3}{\tau_2} \right) \right) + nT$$

[0065]

수학식 22

$$t_6 = \frac{1}{\omega_n} \left(\cos^{-1} \left(-\frac{1}{2} (1 + 4\beta^2 (\frac{\tau_1^2}{4\tau_2^2} - 1) - \frac{\sin\left(\frac{\omega_n V_f A_3}{2\tau_1}\right)}{\sin\left(\frac{\omega_n V_f}{2\tau_2}\right)}) \right) - \frac{\omega_n V_f}{2} \left(\frac{1}{\tau_1} - \frac{A_3}{\tau_2} \right) \right) + mT$$

[0066]

[0067] 구동기 드라이브의 마침(stop) 동작의 시작시간은 t_p 에 의해 결정되며 따라서 상기 구동기 드라이브를 고려한 0의 잔류진동(residual vibration) 해법인 본 발명의 입력성형(DLZV_{AL})의 전체 시퀀스는 수학식 16, 수학식 17, 수학식 21 및 수학식 22로 표시된다.

[0068] 여기서 크레인과 같이 구동기 드라이브의 구동 중에 이동을 하는 경우가 있으므로, 상기 구동기 드라이브를 원하는 이동거리만큼 이동시킬 필요가 있다. 따라서 maple을 이용하여 구동기 드라이브가 원하는 이동거리만큼 이동하는데 걸리는 시간 t_p 를 계산하기 위해 t_2 , t_3 , t_5 , t_6 를 이용하여 움직인 거리 x_d 를 계산하면, 다음의 수학식 23과 같다.

수학식 23

$$x_d = \frac{1}{2} \left(2(t_2 + t_6) + \frac{2v_f}{\tau_2} - \frac{2v_f}{\tau_1} - 2(t_5) \right) v_f + \frac{1}{2} \left(2t_4 + \frac{v_f a_3}{\tau_2} - \frac{v_f a_3}{\tau_1} - 2t_3 \right) v_f a_3$$

[0069]

[0070] 위의 수학식 23을 이용하여 원하는 이동거리를 구동기 드라이브가 이동하는데 걸리는 시간 t_p 를 계산하면, 다음의 수학식 24와 같다.

수학식 24

$$t_p = t_3 + \frac{1}{v_f} \left[x_d - \frac{1}{2} \left(\frac{2 \left(\cos^{-1} \left(\frac{1}{2} \beta \right) - \frac{\omega_n v_f}{2} \left(\frac{1}{\tau_2} - \frac{1}{\tau_1} \right) \right)}{\omega_n} + \frac{v_f}{\tau_2} - \frac{v_f}{\tau_1} \right) v_f - \frac{1}{2} \left(\frac{v_f^2}{\tau_2} - \frac{v_f^2}{\tau_1} \right) \right] - \frac{1}{2} \left[\frac{2 \cos^{-1} \left(-1 + \frac{1}{2} \beta^2 \right)}{\omega_n} + \frac{v_f}{\tau_2} - \frac{v_f}{\tau_1} \right] v_f - \frac{1}{2} \left(\frac{2 \left(\cos^{-1} \left(\frac{1}{2} \beta \right) - \frac{\omega_n v_f}{2} \left(\frac{1}{\tau_1} - \frac{1}{\tau_2} \right) \right)}{\omega_n} \right) v_f \right]$$

[0071]

[0072]

위의 수학식 24에서 계산되어 시간 t_p 를 본 발명의 입력성형(DLZV_{AL})에서 t_4 로 활용하면 구동기 드라이브의 원하는 이동거리 x_d 만큼의 스위치 오프(switch off) 시간이 계산된다. 따라서 구동기 드라이브의 스위치를 온(ON)하여 구동하는 중에, 원하는 이동거리(x_d)만큼 이동시키고자 하는 경우, 상기 x_d 를 통해 $t_p(=t_4)$ 를 계산하고, 상기 t_p 에 의해, 즉 구동기 드라이브의 스위치 오프(switch off) 때까지의 구동시간에 의해 상기 구동기 드라이브를 원하는 이동거리(x_d)만큼 이동시킨다. 이와 같은 x_d 에 대한 t_p 의 분석은 다음의 본 발명의 입력성형(DLZV_{AL}) 평가에서 실시하도록 한다. 또한 상기의 수학식들에서 ω_n 은 시스템의 각속도, V_f 는 시스템의 최대속도, β 는 수학식 17의 결과값이며 수식이 복잡하여 치환하여 나타냄, τ_1 및 τ_2 는 시스템의 가속도와 감속도, n 은 m 은 시간과 관련된 일반상수, T 는 시스템의 주기이다.

[0073]

System natural frequency(ω_n)에 대한 DLZV_{AL}의 임펄스(impulse) 시간에 대해 MATLAB 프로그램을 이용하여 도 4로 표현하였다. simulation에 필요한 변수 설정은 $\tau_1=0.6m/s^2$, $\tau_2=0.8m/s^2$, $L=0.8m$, $t_p=4sec$, $V_f=0.2(m/s)$, $A_3=0.8$ 로 설정하였다. 본 발명의 입력성형(DLZV_{AL}) 제어기의 성능을 평가하기 위해 t_p , τ_1 , τ_2 에 대하여 잔류변위를 평가하였으며, a benchmark pendulum system with single mode를 사용하여 기존의 입력성형(DLZV)과 본 발명의 입력성형(DLZV_{AL})을 비교하여 제어성능을 평가하였다.

[0074]

여기서 비교에 사용된 기존의 입력성형[DLZV(Deflection Limiting Zero Vibration)]은 하나의 속도 값을 갖는 대표적인 입력성형 방법 중에 하나이며 그에 대한 임펄스(impulse)의 amplitude와 time은 다음과 같다.(단, D_{max} =maximum deflection magnitude, D_{lim} =deflection limit)

[0075]

$$\begin{bmatrix} A_i \\ t_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & A_3 \\ 0 & t_2 & t_3 \end{bmatrix}$$

[0076]

$$t_2 = \frac{1}{\omega} \cos^{-1} \left[0.5 \left(2 - 2 \frac{D_{lim}}{D_{max}} \right)^2 \right]$$

[0077]

$$t_3 = \frac{1}{\omega} \cos^{-1} \left[\frac{-D_{lim}}{D_{max}} \right]$$

[0078]

도 4는 진자의 줄 길이(L)에 대하여 나타나는 본 발명의 입력성형(DLZV_{AL})의 임펄스(impulse) 시간을 나타낸다. 줄 길이가 증가할수록 임펄스(impulse) 시간은 증가한다. 도 5는 기존의 입력성형(DLZV)과 본 발명의 입력성형(DLZV_{AL})의 움직인 거리에 따른 펄스(pulse) 지속시간을 나타낸 것이다. 그래프에서 보는 바와 같이 실제 움직인 거리는 기존의 입력성형(DLZV) 보다 본 발명의 입력성형(DLZV_{AL})의 펄스(pulse) 지속시간이 더 길다. 이는 실제

이상적인 해법보다 가속도를 고려함으로써 약간의 시간이 길어졌음을 나타내고 있다. 도 6은 가속도 τ_1 와 감속도 τ_2 의 오차에 따른 민감도(sensitivity)를 나타낸 도면이다. 도면에서 보는 바와 같이 실제 변수와 설계변수 값이 같은 경우에서 가장 진동이 작게 나타난다.

[0079] 도 7은 ω 과 A_3 의 크기에 따른 과도변위의 크기를 나타내었다. ω_n 이 작고 A_3 가 커질수록 과도변위의 크기가 급격하게 상승하고 있다.

[0080] 도 8은 가속도 τ_1 과 감속도 τ_2 에 따른 기존의 입력성형(DLV)과 본 발명의 입력성형(DLV_{AL})의 잔류변위 저감 성능을 비교하였다. 본 발명의 입력성형(DLV_{AL})의 경우 잔류변위가 0에 가깝지만, 기존의 입력성형(DLV)의 경우 τ_1 과 τ_2 가 같은 값을 가질 경우에만 잔류변위가 0에 도달한다. 이것은 실제의 경우 가속도와 감속도가 같은 경우 속도에 대한 전달함수 식이 같아지면서 진동이 저감된다.

[0081] 도 9는 가속도 τ_1 과 펄스(Pulse) 지속시간 t_p 에 따른 기존의 입력성형(DLV)과 본 발명의 입력성형(DLV_{AL})의 잔류변위 저감 성능을 비교하였다. 여기서도 본 발명의 입력성형(DLV_{AL})의 경우 잔류변위가 0에 가깝다. 하지만 기존의 입력성형(DLV)의 경우 잔류변위가 발생되고 t_p 의 값에 따라 주기의 간격으로 진동의 크기가 반복된다. 이것은 실제 기존의 입력성형(DLV)의 경우 시작(start) 동작과 마침(stop) 동작 사이에 발생하는 각각의 진동이 주기와 t_p 에 따라 중첩과 상쇄를 반복하기 때문이다.

[0082] 다음은 본 발명의 입력성형(DLV_{AL}) 제어기를 실험적으로 검증하도록 한다.

[0083] 본 발명에서 개발된 입력성형 제어기의 과도변위 제한 및 잔류진동 저감 성능을 실험적으로 검증하기 위해 도 10의 실험장치를 사용하였다. 미니 크레인(Mini-Crane)은 Siemens PLC(programmable logic controller)로 구성되어있고, 이론 검증을 위해 시스템 구동을 위한 pendant와 실험 data를 입출력할 수 있도록 프로그램을 개발하였다. 실험장치의 구동에는 절대 엔코더를 사용하는 3개의 servo motor를 사용하였고 payload의 흔들림을 측정하기 위해 Siemens VS720x 계열의 intelligent vision sensor를 사용하였다.

[0084] 가속도 제한이 고려된 속도 프로파일(profile)을 Ramp 함수를 이용하여 만들고, 동작을 제어할 수 있는 실험장치에 upload를 통해 실험을 하였으며, intelligent vision sensor를 통해 payload 변위측정을 하였고, matlab software를 통해 측정된 변위를 분석하였다. 실험은 $\tau_1=0.6\text{m/s}^2$, $\tau_2=0.8\text{m/s}^2$, $t_p=4\text{sec}$, $L=0.8\text{m}$, $A_3=0.8$ 로 설정하였다. 실험은 이론속도 $V_f=0.2(\text{m/s})$ 로 설정하고, 시작(start)-마침(stop) 동작을 통해 케이블 길이(L) 또는 t_p 을 바꿔가며 잔류진동을 검증하였다.

[0085] 도 11은 실제 실험에 사용된 본 발명의 입력성형(DLV_{AL})의 명령어의 입력 명령어와 실제 구동기가 움직인 실제의 명령어를 각각 나타낸다. 두 제어기의 차이점은 스위칭 시간이 다르다는 점을 제외하고 다른 점은 없다.

[0086] 도 12 및 도 13은 기존의 입력성형(DLV)과 본 발명의 입력성형(DLV_{AL})의 잔류변위를 나타내고 있다. 기존의 입력성형(DLV)의 잔류변위를 나타내는 도 12에서 보면 기존의 입력성형(DLV) 보다 본 발명의 입력성형(DLV_{AL})이 과도변위 저감 성능을 보이며 잔류진동 저감 효과 역시 더 높은 성능을 나타낸다. 도 13에서 보여지는 기존의 입력성형(DLV)과 본 발명의 입력성형(DLV_{AL})의 정지 후 움직인 거리의 차이는 두 제어기의 스위칭 시간이 서로 다르기 때문에 발생하는 거리의 차이 이다.

[0087] 도 14는 system frequency에 modeling error에 대한 본 발명의 입력성형(DLV_{AL})의 민감도(sensitivity)를 나타내며, 입력성형 제어기의 성능 비교에 많은 영향을 끼치는 요인이다. 도 8에서 보는 바와 같이 본 발명의 입력성형(DLV_{AL})의 경우 실험영역에서 잔류진동이 0.5cm 이하의 값이 나오지만, 기존의 입력성형(DLV)의 경우 0.6cm 이상의 잔류진동을 보인다. 또한 강건성 역시 본 발명의 입력성형(DLV_{AL})의 경우가 더 강건하다.

[0088] 도 15는 t_p 에 대한 잔류진동 저감 성능을 보이고 있으며 본 발명의 입력성형(DLV_{AL}), 기존의 입력성형(DLV)을 비교하였다. 시작(start)-마침(stop) 동작이 포함된 기존의 입력성형(DLV)은 t_p 의 영향으로 시스템의 주기의 간격으로 잔류진동이 0이 되는 지점이 발생하는 모습이 나타난다. 본 발명의 입력성형(DLV_{AL})은 t_p 에 대해 0.15cm 이하의 잔류진동 크기를 보이고 있으나 기존의 입력성형(DLV)은 최대 0.53cm의 잔류진동의 크기를 보이

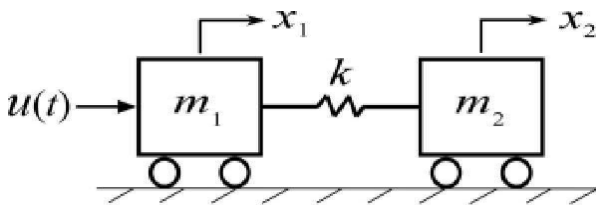
고 있어 기존의 입력성형(DLV) 보다 구동기의 동적 특성을 고려한 본 발명의 입력성형(DLV_{AL})이 72% 개선된 제어 성능을 나타내고 있다.

[0089] 결론적으로 본 발명에서는 실제 생산시스템의 구동기 드라이브의 가속도 제한으로 인한 과도변위 제한 성능 저하를 개선하기 위해 폐쇄형(closed-form)의 입력성형(DLV_{AL})을 제시하였다. 본 발명의 입력성형(DLV_{AL})은 ramp step에 대한 응답을 벡터로 표시하고 이를 vector diagram approach 통해 개발하였다. 제시한 본 발명의 입력성형 제어기의 지정된 위치 이동을 위해 A_3 로 인한 이동거리의 감소를 고려한 펄스(pulse) 지속시간 식을 제시함으로써 지정된 위치의 이동이 가능한 과도변위 제어를 설계할 수 있도록 하였다. 또한 입력성형 제어기의 성능평가를 위해 τ_1 와 t_p 및 τ_1 와 τ_2 에 대한 잔류진동의 크기를 기존의 입력성형(DLV)과 비교하였으며 실제 과도변위 저감 성능과 잔류진동 저감에 τ_1 과 τ_2 가 같은 값을 가지는 경우를 제외한 나머지 τ_1 , τ_2 영역에서 약 70% 이상의 성능이 향상됨을 보였다. 이를 검증하기 위하여 실제 미니 크레인(mini-crane)에 적용하여 주파수에 대한 modeling error, t_p 에 따른 잔류진동을 실험하여 성능을 검증하였다.

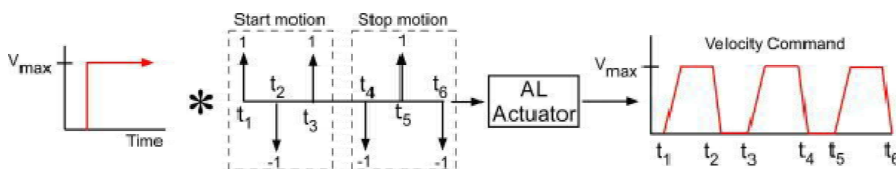
[0090] 이상과 같이 본 발명에 따른 가속도가 제한된 유연시스템의 과도변위 제한 및 잔류진동 저감을 위한 입력성형 제어기 및 이에 의한 과도변위 제한 및 잔류진동 저감방법에 대해서 예시한 도면을 참조로 하여 설명하였으나, 본 명세서에 개시된 실시예와 도면에 의해 본 발명이 한정되는 것은 아니며, 본 발명의 기술사상의 범위 내에서 당업자에 의해 다양한 변형이 이루어질 수 있음은 물론이다.

도면

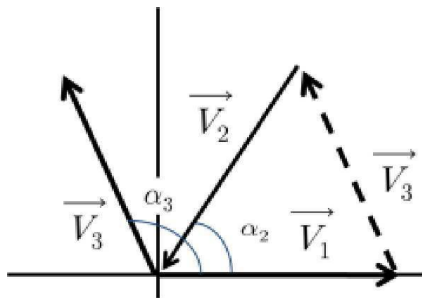
도면1



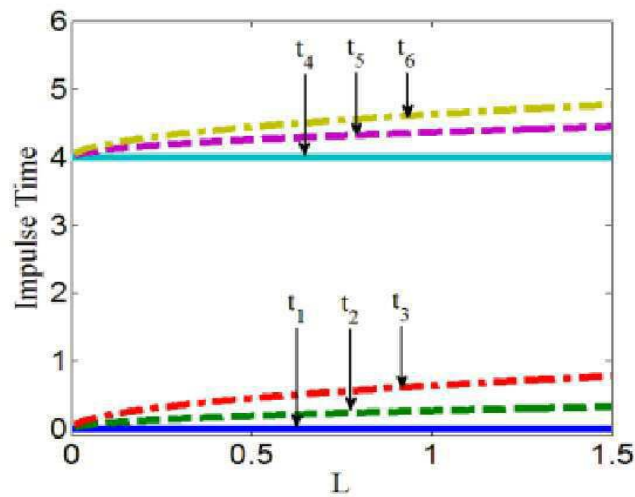
도면2



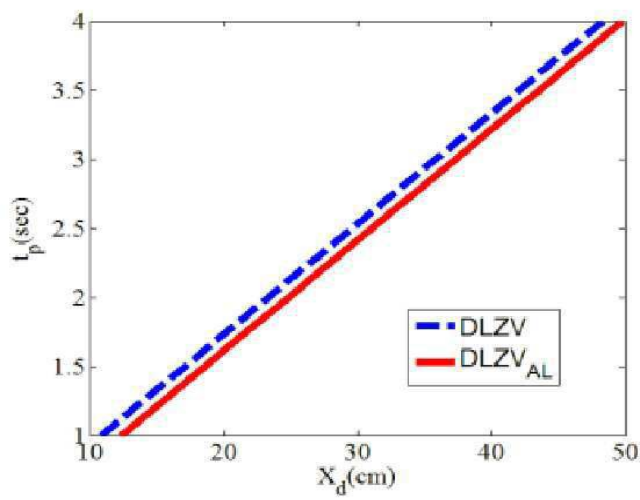
도면3



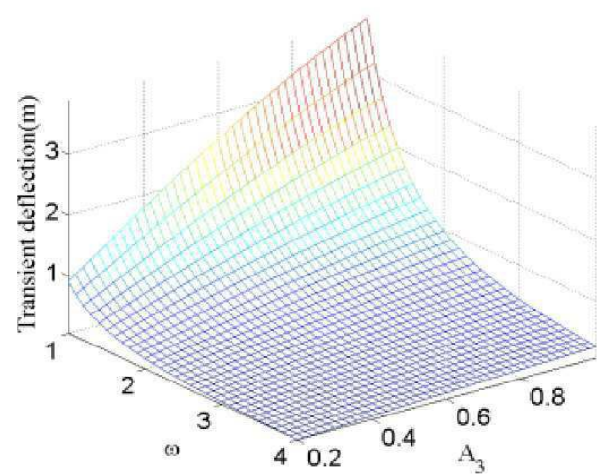
도면4



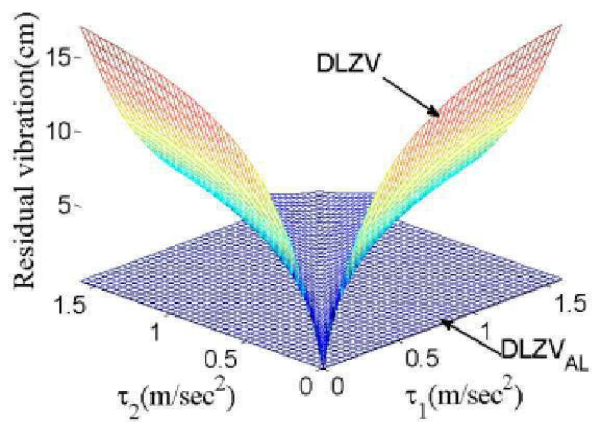
도면5



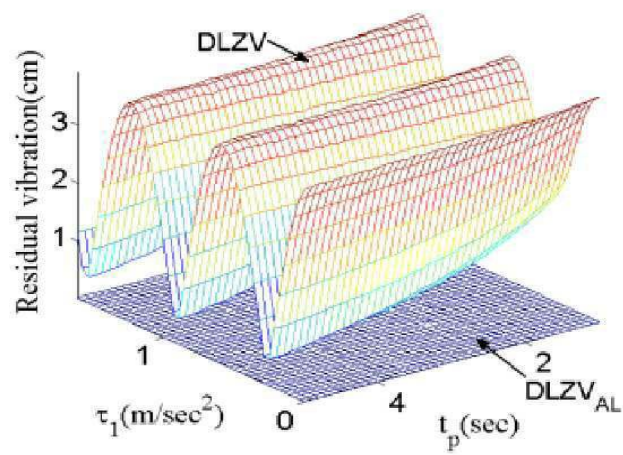
도면6



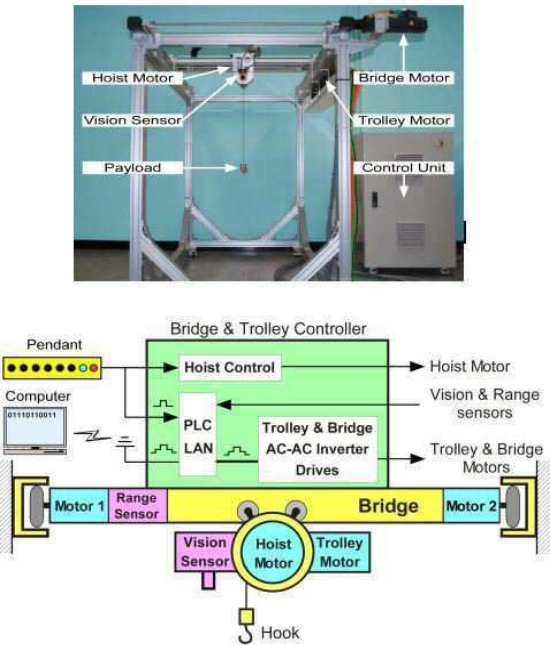
도면8



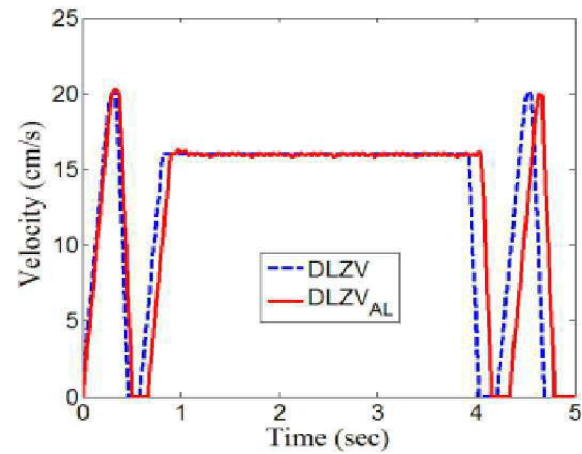
도면9



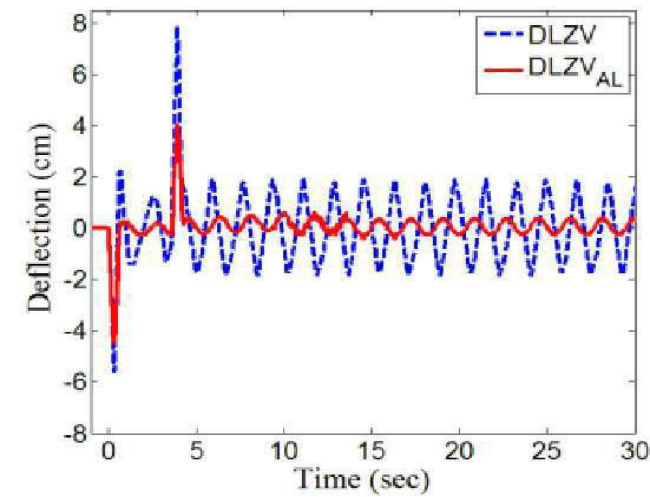
도면10



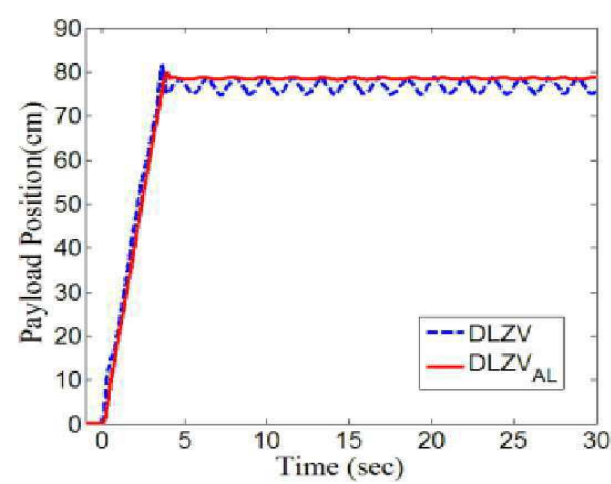
도면11



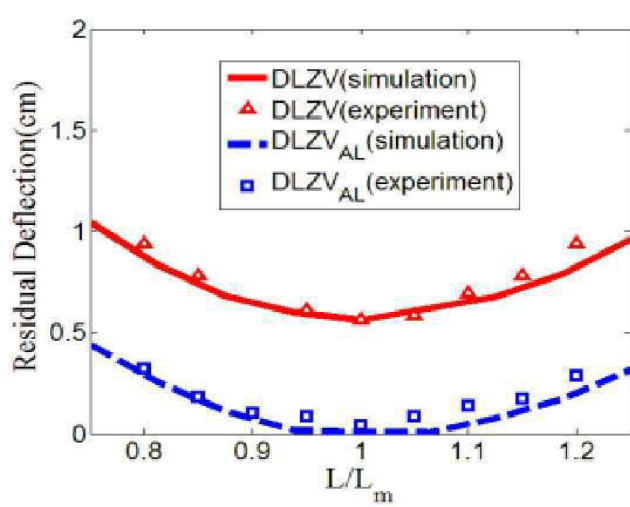
도면12



도면13



도면14



도면15

