



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2020년07월10일
(11) 등록번호 10-2132689
(24) 등록일자 2020년07월06일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G05B 19/404 (2006.01) G05B 11/26 (2006.01)
(52) CPC특허분류
G05B 19/404 (2013.01)
G05B 11/26 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2019-0013044
(22) 출원일자 2019년01월31일
심사청구일자 2019년01월31일
(56) 선행기술조사문헌
KR1020150093997 A
KR1020140139386 A
KR1020110087449 A

(73) 특허권자
조선대학교산학협력단
광주광역시 동구 필문대로 309 (서석동)
(72) 발명자
성윤경
광주광역시 동구 필문대로 309 조선대학교
김명수
광주광역시 동구 동명로98번길 20-16 태영오피스
텔 304호
(74) 대리인
특허법인지원

전체 청구항 수 : 총 4 항

심사관 : 강성철

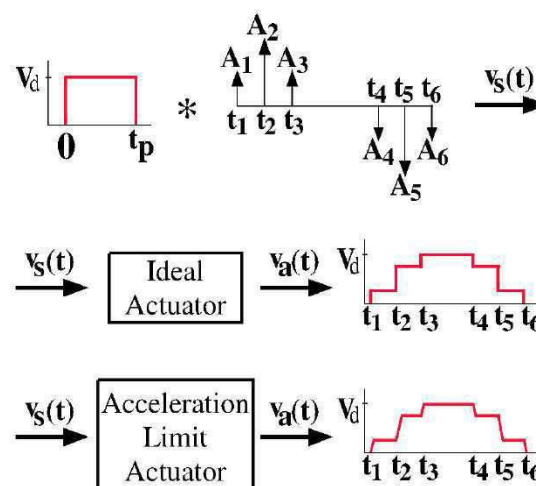
(54) 발명의 명칭 1차형 구동기에 대한 선형기반의 강건 입력성형기

(57) 요약

본 발명은 선형기반의 입력성형기를 1차형 구동기에 적용하였을 때, 잔류변위의 발생을 최소화하고 입력성형기의 성능을 높여 강건성을 증가시킨 1차형 구동기에 대한 선형기반의 강건 입력성형기에 관한 것이다.

본 발명에 따른 1차형 구동기에 대한 선형기반의 강건 입력성형기는 유연시스템의 운동에서 펜듈럼 시스템(pendulum system)에 대한 하중을 모델링한 방정식을 이용하여 페이저 벡터(phaser vector) 형태로 나타낸 잔류변위에 대한 변위 벡터를 이용한 펄스 시점(t_P)에 따른 각각의 임펄스 A_1 , A_2 및 A_3 에 대한 벡터 $\vec{V}_1$, $\vec{V}_2$, $\vec{V}_3$ 를 구하고, 상기 세 벡터를 이용하여 상기 유연시스템의 운동 중의 잔류 진동 감소를 위한 임펄스의 시간 t_2 와 t_3 , t_5 및 t_6 를 구하여, 상기 t_2 , t_3 , t_5 , t_6 를 1차형 구동기에 대한 상기 유연시스템의 운동을 위한 입력커맨드에 활용하여 잔류 진동을 감소하도록 한 것이다.

대표도 - 도1



(52) CPC특허분류

G05B 19/05 (2013.01)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호 1345285441

부처명 교육부

연구관리전문기관 한국연구재단

연구사업명 지역대학우수과학자지원사업(1년~3년)

연구과제명 비선형유연계의 선회변위저감을 위한 지능원격제어시스템

기 여 율 1/1

주관기관 조선대학교

연구기간 2018.09.01 ~ 2019.06.30

공지예외적용 : 있음

명세서

청구범위

청구항 1

유연시스템의 운동에서, 펜듈럼 시스템(pendulum system)에 대한 하중을 모델링한 방정식을 이용하여 페이지 벡터(phaser vector) 형태로 나타낸 잔류 변위에 대한 변위 벡터를 이용한 벡터 $\vec{V}_1$, $\vec{V}_2$, $\vec{V}_3$ 를 구하고,

상기 세 벡터를 이용하여 상기 유연시스템의 운동 중의 잔류 진동 감소를 위한 임펄스의 시간 t_2 와 t_3 를 다음과 같은 수학식으로 계산하며,

$$t_2 = \frac{1}{\omega_n} \left[\pi - \alpha + \tan^{-1} \left(\frac{1}{\tau_{u2}\omega_n} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{1}{\tau_{u1}\omega_n} \right) \right]$$

$$t_3 = \frac{1}{\omega_n} \left[\pi + \beta + \tan^{-1} \left(\frac{1}{\tau_{u3}\omega_n} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{1}{\tau_{u1}\omega_n} \right) \right]$$

$$\alpha = \cos^{-1} \left(\frac{|\vec{V}_1| + |\vec{V}_2| - |\vec{V}_3|}{2|\vec{V}_1||\vec{V}_2|} \right) = \cos^{-1} \left(\frac{1}{4} \frac{\omega_n^4 (4\tau_{u1}^2\tau_{u3}^2 + \tau_{u2}^2\tau_{u3}^2 - \tau_{u1}^2\tau_{u2}^2) + 3\omega_n^2\tau_{u1}^2 + 5\omega_n^2\tau_{u3}^2 + 4}{(\omega_n^2\tau_{u3}^2 + 1)\sqrt{(\omega_n^2\tau_{u1}^2 + 1)(\omega_n^2\tau_{u2}^2 + 1)}} \right)$$

여기서,

$$\beta = \cos^{-1} \left(\frac{|\vec{V}_1|^2 + |\vec{V}_3|^2 - |\vec{V}_2|^2}{2|\vec{V}_1||\vec{V}_3|} \right) = \cos^{-1} \left(\frac{1}{2} \frac{\omega_n^4 (\tau_{u1}^2\tau_{u2}^2 + \tau_{u2}^2\tau_{u3}^2 - 4\tau_{u1}^2\tau_{u3}^2) - \omega_n^2 (3\tau_{u1}^2 + 3\tau_{u3}^2 - 2\tau_{u2}^2) - 2}{(\omega_n^2\tau_{u2}^2 + 1)\sqrt{(\omega_n^2\tau_{u1}^2 + 1)(\omega_n^2\tau_{u3}^2 + 1)}} \right)$$

상기와 같은 방법으로 유연시스템의 운동 후 잔류 진동 감소를 위하여 정지동작에 대한 t_5 , t_6 를 다음과 같은 수학식으로 구하여,

$$t_5 = t_p + \frac{1}{\omega_n} \left[\pi - \alpha' + \tan^{-1} \left(\frac{1}{\tau_{d2}\omega_n} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{1}{\tau_{d1}\omega_n} \right) \right]$$

$$t_6 = t_p + \frac{1}{\omega_n} \left[\pi + \beta' + \tan^{-1} \left(\frac{1}{\tau_{d3}\omega_n} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{1}{\tau_{d1}\omega_n} \right) \right]$$

$$\alpha' = \cos^{-1} \left(\frac{|\vec{V}_4| + |\vec{V}_5| - |\vec{V}_6|}{2|\vec{V}_4||\vec{V}_5|} \right) = \cos^{-1} \left(\frac{1}{4} \frac{\omega_n^4 (4\tau_{d1}^2\tau_{d3}^2 + \tau_{d2}^2\tau_{d3}^2 - \tau_{d1}^2\tau_{d2}^2) + 3\omega_n^2\tau_{d1}^2 + 5\omega_n^2\tau_{d3}^2 + 4}{(\omega_n^2\tau_{d3}^2 + 1)\sqrt{(\omega_n^2\tau_{d1}^2 + 1)(\omega_n^2\tau_{d2}^2 + 1)}} \right)$$

여기서,

$$\beta' = \cos^{-1} \left(\frac{|\vec{V}_4|^2 + |\vec{V}_6|^2 - |\vec{V}_5|^2}{2|\vec{V}_4||\vec{V}_6|} \right) = \cos^{-1} \left(\frac{1}{2} \frac{\omega_n^4 (\tau_{d1}^2\tau_{d2}^2 + \tau_{d2}^2\tau_{d3}^2 - 4\tau_{d1}^2\tau_{d3}^2) - \omega_n^2 (3\tau_{d1}^2 + 3\tau_{d3}^2 - 2\tau_{d2}^2) - 2}{(\omega_n^2\tau_{d2}^2 + 1)\sqrt{(\omega_n^2\tau_{d1}^2 + 1)(\omega_n^2\tau_{d3}^2 + 1)}} \right)$$

[상기 수학식에서,

ω_n : 펜듈럼 시스템의 고유진동수

τ_{u1} : 구동기의 시작 동작(ℓ^1)시점의 가속 시상수

τ_{u2} : 구동기의 시작 동작 이후 가속시점 ℓ^2 의 가속 시상수

τ_{u3} : 가속시점 t_2 이후 가속시점 t_3 의 가속 시상수

τ_{d1} : 가속시점 t_3 이후 감속시점 t_4 의 감가속 시상수

τ_{d2} : 감속시점 t_4 이후 감속시점 t_5 의 감가속 시상수

τ_{d3} : 감속시점 t_5 이후 정지시점 t_6 의 감가속 시상수를 의미함]

상기 t_2 , t_3 , t_5 , 및 t_6 를 비선형 구동기에 대한 상기 유연시스템의 운동을 위한 입력커맨드에 이용하는,
1차형 구동기에 대한 선형기반의 강건 입력성형기.

청구항 2

제1항에 있어서,

상기 벡터 $\vec{V}_1$, $\vec{V}_2$, $\vec{V}_3$ 의 크기와 위상각은,

$$\begin{aligned}\vec{V}_1 &= \left| \frac{A_1 V_d}{L w_n \sqrt{(\tau_{u1} w_n)^2 + 1}} \right| \angle \left[w_n t_1 - \frac{3}{2} \pi + \tan^{-1} \left(\frac{1}{\tau_{u1} w_n} \right) \right] \\ \vec{V}_2 &= \left| \frac{A_2 V_d}{L w_n \sqrt{(\tau_{u2} w_n)^2 + 1}} \right| \angle \left[w_n t_2 - \frac{3}{2} \pi + \tan^{-1} \left(\frac{1}{\tau_{u2} w_n} \right) \right] \\ \vec{V}_3 &= \left| \frac{A_3 V_d}{L w_n \sqrt{(\tau_{u3} w_n)^2 + 1}} \right| \angle \left[w_n t_3 - \frac{3}{2} \pi + \tan^{-1} \left(\frac{1}{\tau_{u3} w_n} \right) \right]\end{aligned}$$

[상기 수학식에서,

ω_n : 펜듈럼 시스템의 고유진동수

τ_{u1} : 구동기의 시작 동작(t_1)시점의 가속 시상수

τ_{u2} : 구동기의 시작 동작 이후 가속시점 t_2 의 가속 시상수

τ_{u3} : 가속시점 t_2 이후 가속시점 t_3 의 가속 시상수

L: 펜듈럼 시스템의 줄 길이

A_1 , A_2 , A_3 : 펄스 시점(t_i) t_1 , t_2 , t_3 의 각각의 임펄스를 의미함] 인,

1차형 구동기에 대한 선형기반의 강건 입력성형기.

청구항 3

제1항 또는 제2항에 있어서,

다음의 수학식

$$\tau_{u1} \neq \tau_{u2} \neq \tau_{u3}$$

[상기 수학식에서,

τ_{u1} : 구동기의 시작 동작(ℓ^1)시점의 가속 시상수

τ_{u2} : 구동기의 시작 동작 이후 가속시점 ℓ^2 의 가속 시상수

τ_{u3} : 가속시점 ℓ^2 이후 가속시점 ℓ^3 의 가속 시상수를 의미함]

을 만족하는,

1차형 구동기에 대한 선형기반의 강건 입력성형기.

청구항 4

제1항 또는 제2항에 있어서,

다음의 수학식

$$t_{i+1} > t_i + 3.9\tau_i$$

[상기 수학식에서,

ℓ_i : i번째 임펄스 시간

τ_i : i번째 임펄스의 시상수를 의미함]

을 만족하는,

1차형 구동기에 대한 선형기반의 강건 입력성형기.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 1차(1st-order)형 구동기에 대한 선형기반의 강건 입력성형기에 관한 것으로, 더욱 상세하게는 선형기반의 입력성형기를 1차형 구동기에 적용하였을 때, 잔류변위의 발생을 최소화하고 입력성형기의 성능을 높여 강건성을 증가시킨 1차형 구동기에 대한 선형기반의 강건 입력성형기에 관한 것이다.

배경 기술

[0002] 유연시스템은 산업현장에서 생산성, 안전성 등 다양한 영향을 미치고 있기 때문에 산업현장에서 작업효율을 높이기 위해서는 이러한 유연시스템의 이동과 위치에 관한 제어가 매우 중요하다.

[0003] 입력성형 제어방법을 이용하는 입력성형기는 물체의 이동과 이동이 끝난 후의 변위를 저감하여 유연시스템에서 발생하는 잔류변위를 저감하는 효과적인 수단이다. 그러나 산업 현장의 다양한 외부 요인들로 인해 시스템 모델링 오차에 따른 잔류변위 저감 성능이 감소하는 문제가 있다. 또한 모터나 모터 드라이버의 성능을 초과하는 가속도가 작용되는 경우 모터가 그 궤적에 대해 응답할 수 없으며 그러한 상태에서 사용시 모터나 모터 드라이버의 제어 성능이 떨어지므로 가속도를 제한하는 경우가 많다.

[0004] 산업 현장에서는 시스템의 오차에 대한 강건 입력성형기에 관한 연구들이 계속 진행되어 왔다. Singer는 시스템의 고유주파수 오차에 대한 강건성을 위하여 Zero Vibration(ZV) 입력성형기의 고유주파수를 미분한 식을 이용하여 3개의 임펄스 형태의 Zero Vibration Derivate(ZVD) 입력성형기를 개발하였다.

[0005] 또한 Singhose, Seering과 Singer는 잔류변위 식을 잔류변위 벡터로 나타내어 벡터 다이어그램 접근법을 활용한 hump 형태의 일정 변위를 허용하는 강건한 Extra Insensitivity(EI) 입력성형기를 제시하였다. EI 입력성형기의 경우 원하는 잔류변위를 허용하는 대신 강건성을 향상시킨 것으로, 기존의 ZVD 입력성형기보다 시스템 모델링

오차에 대해 더 강건함을 보인다.

[0006] 그러나 상기 EI 입력성형기나 ZVD 입력성형기 모두 시스템 모델링 오차에 대해서는 강건함을 보이지만 가속도 제한이 고려되지 않아 실제 산업현장에서 활용할 경우 특히, 1차형 구동기의 경우, 잔류변위의 성능이 기대했던 만큼 나타나지 않는 문제가 있다.

선행기술문헌

특허문헌

[0007] (특허문헌 0001) 한국 공개특허공보 제10-2011-0132640호 비선형 구동기에 적용가능한 입력성형기 및 입력성형 방법

발명의 내용

해결하려는 과제

[0008] 본 발명은 상기 문제점을 해결하기 위해 창출된 것으로서, 선형시스템을 기반으로 1차형 구동기에 대해 강건한 명령을 생성할 수 있도록, 선형시스템에 기반한 입력성형기를 1차형 구동기에 적용했을 때 잔류변위가 발생하는 것에 대하여, 1차형 구동기 즉, 비선형 구동기의 동적 특성을 고려한 pendulum system의 정상상태 응답식을 통해 phasor form로 나타내고 vector diagram approach를 적용하는 1차형 구동기에 대한 선형기반의 강건 입력성형기를 제공하는데 그 목적이 있다.

과제의 해결 수단

[0009] 상기 목적을 달성하기 위한 본 발명에 따른 1차형 구동기에 대한 선형기반의 강건 입력성형기는 유연시스템의 운동에서 펜듈럼 시스템(pendulum system)에 대한 하중을 모델링한 방정식을 이용하여 페이저 벡터(phasor vector) 형태로 나타낸 잔류 변위에 대한 변위 벡터를 이용한 벡터 $\vec{V}_1$, $\vec{V}_2$, $\vec{V}_3$ 를 구하고, 상기 세 벡터를 이용하여 상기 유연시스템의 운동 중의 잔류 진동 감소를 위한 임펄스의 시간 t_2 와 t_3 를 다음과 같은 수학식으로 계산하며,

$$t_2 = \frac{1}{\omega_n} \left[\pi - \alpha + \tan^{-1} \left(\frac{1}{\tau_{u2} \omega_n} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{1}{\tau_{u1} \omega_n} \right) \right]$$

[0010]

$$t_3 = \frac{1}{\omega_n} \left[\pi + \beta + \tan^{-1} \left(\frac{1}{\tau_{u3} \omega_n} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{1}{\tau_{u1} \omega_n} \right) \right]$$

[0011]

$$\alpha = \cos^{-1} \left(\frac{|\vec{V}_1| + |\vec{V}_2| - |\vec{V}_3|}{2 |\vec{V}_1| |\vec{V}_2|} \right) = \cos^{-1} \left(\frac{1}{4} \frac{w_n^4 (4\tau_{u1}^2 \tau_{u3}^2 + \tau_{u2}^2 \tau_{u3}^2 - \tau_{u1}^2 \tau_{u2}^2) + 3w_n^2 \tau_{u1}^2 + 5w_n^2 \tau_{u3}^2 + 4}{(w_n^2 \tau_{u3}^2 + 1) \sqrt{(w_n^2 \tau_{u1}^2 + 1)(w_n^2 \tau_{u2}^2 + 1)}} \right)$$

[0012] 여기서,

$$\beta = \cos^{-1} \left(\frac{|\vec{V}_1| + |\vec{V}_3| - |\vec{V}_2|}{2 |\vec{V}_1| |\vec{V}_3|} \right) = \cos^{-1} \left(\frac{1}{2} \frac{w_n^4 (\tau_{u1}^2 \tau_{u2}^2 + \tau_{u2}^2 \tau_{u3}^2 - 4\tau_{u1}^2 \tau_{u3}^2) - w_n^2 (3\tau_{u1}^2 + 3\tau_{u3}^2 - 2\tau_{u2}^2) - 2}{(w_n^2 \tau_{u2}^2 + 1) \sqrt{(w_n^2 \tau_{u1}^2 + 1)(w_n^2 \tau_{u3}^2 + 1)}} \right)$$

[0013]

[0014] 상기와 같은 방법으로 유연시스템의 운동 후 잔류 진동 감소를 위하여 정지동작에 대한 t_5 , t_6 를 다음과 같은 수학적식으로 구하여,

$$t_5 = t_p + \frac{1}{\omega_n} \left[\pi - \alpha' + \tan^{-1} \left(\frac{1}{\tau_{d2} \omega_n} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{1}{\tau_{d1} \omega_n} \right) \right]$$

[0015]

$$t_6 = t_p + \frac{1}{\omega_n} \left[\pi + \beta' + \tan^{-1} \left(\frac{1}{\tau_{d3} \omega_n} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{1}{\tau_{d1} \omega_n} \right) \right]$$

$$\alpha' = \cos^{-1} \left(\frac{|\vec{V}_4| + |\vec{V}_5| - |\vec{V}_6|}{2|\vec{V}_4||\vec{V}_5|} \right) = \cos^{-1} \left(\frac{1}{4} \frac{w_n^4 (4\tau_{d1}^2 \tau_{d3}^2 + \tau_{d1}^2 \tau_{d3}^2 - \tau_{d1}^2 \tau_{d2}^2) + 3w_n^2 \tau_{d1}^2 + 5w_n^2 \tau_{d3}^2 + 4}{(w_n^2 \tau_{d3}^2 + 1) \sqrt{(w_n^2 \tau_{d1}^2 + 1)(w_n^2 \tau_{d2}^2 + 1)}} \right)$$

$$\beta' = \cos^{-1} \left(\frac{|\vec{V}_4| + |\vec{V}_6| - |\vec{V}_5|}{2|\vec{V}_4||\vec{V}_6|} \right) = \cos^{-1} \left(\frac{1}{2} \frac{w_n^4 (\tau_{d1}^2 \tau_{d2}^2 + \tau_{d2}^2 \tau_{d3}^2 - 4\tau_{d1}^2 \tau_{d3}^2) - w_n^2 (3\tau_{d1}^2 + 3\tau_{d3}^2 - 2\tau_{d2}^2) - 2}{(w_n^2 \tau_{d2}^2 + 1) \sqrt{(w_n^2 \tau_{d1}^2 + 1)(w_n^2 \tau_{d3}^2 + 1)}} \right)$$

[상기 수학식에서,

ω_n : 펜듈럼 시스템의 고유진동수

τ_{u1} : 구동기의 시작 동작(t^1)시점의 가속 시상수

τ_{u2} : 구동기의 시작 동작 이후 가속시점 t^2 의 가속 시상수

τ_{u3} : 가속시점 t^2 이후 가속시점 t^3 의 가속 시상수

τ_{d1} : 가속시점 t^3 이후 감속시점 t^4 의 감가속 시상수

τ_{d2} : 감속시점 t^4 이후 감속시점 t^5 의 감가속 시상수

τ_{d3} : 감속시점 t^5 이후 정지시점 t^6 의 감가속 시상수를 의미함]

상기 t_2 , t_3 , t_5 , 및 t_6 를 비선형 구동기에 대한 상기 유연시스템의 운동을 위한 입력커맨드에 활용하여 잔류 진동을 감소시킨다.

상기 벡터 $\vec{V}_1$, $\vec{V}_2$, $\vec{V}_3$ 의 크기와 위상각은,

$$\vec{V}_1 = \left| \frac{A_1 V_d}{L w_n \sqrt{(\tau_{u1} w_n)^2 + 1}} \right| \angle \left[w_n t_1 - \frac{3}{2} \pi + \tan^{-1} \left(\frac{1}{\tau_{u1} w_n} \right) \right]$$

$$\vec{V}_2 = \left| \frac{A_2 V_d}{L w_n \sqrt{(\tau_{u2} w_n)^2 + 1}} \right| \angle \left[w_n t_2 - \frac{3}{2} \pi + \tan^{-1} \left(\frac{1}{\tau_{u2} w_n} \right) \right]$$

$$\vec{V}_3 = \left| \frac{A_3 V_d}{L w_n \sqrt{(\tau_{u3} w_n)^2 + 1}} \right| \angle \left[w_n t_3 - \frac{3}{2} \pi + \tan^{-1} \left(\frac{1}{\tau_{u3} w_n} \right) \right]$$

[상기 수학식에서,

ω_n : 펜듈럼 시스템의 고유진동수

τ_{u1} : 구동기의 시작 동작(t^1)시점의 가속 시상수

τ_{u2} : 구동기의 시작 동작 이후 가속시점 t^2 의 가속 시상수

τ_{u3} : 가속시점 t^2 이후 가속시점 t^3 의 가속 시상수

[0037] L: 펜듈럼 시스템의 줄 길이

[0038] A_1, A_2, A_3 : 펄스 시점(t_i) t_1, t_2, t_3 의 각각의 임펄스를 의미함]이다.

[0039] 한편, 본 발명에 따른 1차형 구동기에 대한 선형기반의 강건 입력성형기는 다음의 수학적식 $\tau_{u1} \neq \tau_{u2} \neq \tau_{u3}$

[0040] [상기 수학적식에서,

[0041] τ_{u1} : 구동기의 시작 동작(t_1)시점의 가속 시상수

[0042] τ_{u2} : 구동기의 시작 동작 이후 가속시점 t_2 의 가속 시상수

[0043] τ_{u3} : 가속시점 t_2 이후 가속시점 t_3 의 가속 시상수를 의미함] 을 만족하는 것이 바람직하다.

[0044] 또한, 본 발명에 따른 1차형 구동기에 대한 선형기반의 강건 입력성형기는 다음의 수학적식 $t_{i+1} > t_i + 3.9\tau_i$

[0045] [상기 수학적식에서,

[0046] t_i : i번째 임펄스 시간

[0047] τ_i : i번째 임펄스의 시상수를 의미함]

[0048] 을 만족하는 것이 바람직하다.

발명의 효과

[0049] 본 발명에 따른 1차형 구동기에 대한 선형기반의 강건 입력성형기는 선형 기반의 입력성형기를 1차형 구동기에 적용할 때, 간단한 수식의 적용을 통해 잔류변위의 발생을 최소화함으로써 산업현장에서 작업 효율을 높이고, 이동과 위치에 대한 제어 성능을 상승시키는 유연시스템을 구현할 수 있는 장점이 있다.

도면의 간단한 설명

[0050] 도 1은 ZVD 입력성형기를 이상적인 구동기와 1차형 구동기에 적용했을 때의 성능 비교를 표시한 그래프,

도 2는 본래의 명령 절차와 1차형(1st-order)의 입력 명령으로 변환하여 단순화된 명령절차를 표시한 개념도,

도 3은 펜듈럼 시스템의 개념을 표시한 도면,

도 4는 시작명령의 범위와 세분화된 프로파일을 표시한 도면,

도 5는 임펄스 크기가 ZVD 입력성형기와 EI 입력성형기의 잔류변위에 미치는 영향을 표시한 그래프,

도 6은 본 발명의 1차형 구동기에 대한 선형기반의 강건 입력성형기의 벡터 다이어그램을 표시한 그림,

도 7은 속도에 따른 시정 수의 변화를 표시한 그래프,

도 8은 펄스 지속시간(pulse duration)(t_p)에 따른 ZVD 입력성형기와 본 발명의 입력성형기(ZVD_F)의 잔류변위 변화를 표시한 그래프,

도 9는 줄 길이 L_m 에 따른 ZVD 입력성형기와, 본 발명의 입력성형기(ZVD_F)의 잔류변위 변화를 표시한 그래프,

도 10은 두번째 가속 시상수(τ_{u2})와 두번째 감가속 시상수(τ_{u2})에 따른 ZVD 입력성형기와, 본 발명의 입력성형기(ZVD_F)의 잔류변위의 크기를 표시한 그림,

도 11은 줄 길이 L_m 과 두번째 시상수(τ_{u2})에 따른 본 발명의 입력성형기(ZVD_F)와, 종래의 ZVD 입력성형기의 강건성을 비교한 그림,

도 12는 첫번째 시상수(τ_{u1})와 지속시간(t_P)에 따른 본 발명의 입력성형기(ZVD_F)와, 종래의 ZVD 입력성형기의 잔류변위의 크기를 비교한 그림,

도 13은 줄 길이 L_m 과 첫번째 시상수(τ_{u1})에 따른 본 발명의 입력성형기(ZVD_F)와 종래의 ZVD 성형기의 강건성을 비교한 그림

도 14는 실험 검증을 위한 시뮬레이션에 적용된 미니 브리지 크레인의 일 실시예의 사시도,

도 15는 도 14의 미니 브리지 크레인의 하드웨어의 구성을 개념적으로 표시한 구성도,

도 16은 입력한 명령과 미니 브리지 크레인에서 실행하는 명령의 오차를 표시한 그래프,

도 17은 ZVD 입력성형기와 본 발명의 입력성형기(ZVD_F)의 페이로드 편향응답을 표시한 그래프,

도 18은 본 발명의 입력성형기(ZVD_F)와 ZVD 입력성형기의 줄 길이에 대한 강건성을 시상수의 크기에 따라 나누어 비교한 그래프,

도 19는 본 발명의 입력성형기(ZVD_F)와 ZVD 입력성형기의 첫번째 시상수(τ_{u1})에 대해서 강건성을 비교한 그래프,

도 20은 본 발명의 입력성형기(ZVD_F)와 ZVD 입력성형기의 두번째 시상수(τ_{u2})에 대해서 강건성을 비교한 그래프이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

- [0051] 이하, 첨부한 도면을 참조하여 본 발명의 실시예에 따른 1차형 구동기에 대한 선형기반의 강건 입력성형기에 대해 상세히 설명한다. 본 발명은 다양한 변경을 가할 수 있고 여러 가지 형태를 가질 수 있는 바, 특정 실시 예들을 도면에 예시하고 본문에 상세하게 설명하고자 한다. 그러나 이는 본 발명을 특정한 개시 형태에 대해 한정하려는 것이 아니며, 본 발명의 사상 및 기술 범위에 포함되는 모든 변경, 균등물 내지 대체물을 포함하는 것으로 이해되어야 한다. 각 도면을 설명하면서 유사한 참조부호를 유사한 구성요소에 대해 사용하였다. 첨부된 도면에 있어서, 구조물들의 치수는 본 발명의 명확성을 기하기 위하여 실제보다 확대하여 도시한 것이다.
- [0052] 제1, 제2 등의 용어는 다양한 구성요소들을 설명하는데 사용될 수 있지만, 상기 구성요소들은 상기 용어들에 의해 한정되어서는 안 된다. 상기 용어들은 하나의 구성요소를 다른 구성요소로부터 구별하는 목적으로만 사용된다. 예를 들어, 본 발명의 권리 범위를 벗어나지 않으면서 제1 구성요소는 제2 구성요소로 명명될 수 있고, 유사하게 제2 구성요소도 제1 구성요소로 명명될 수 있다.
- [0053] 본 출원에서 사용한 용어는 단지 특정한 실시 예를 설명하기 위해 사용된 것으로, 본 발명을 한정하려는 의도가 아니다. 단수의 표현은 문맥상 명백하게 다르게 뜻하지 않는 한, 복수의 표현을 포함한다. 본 출원에서, "포함하다" 또는 "가지다" 등의 용어는 명세서 상에 기재된 특징, 숫자, 단계, 동작, 구성요소, 부분품 또는 이들을 조합한 것이 존재함을 지정하려는 것이지, 하나 또는 그 이상의 다른 특징들이나 숫자, 단계, 동작, 구성요소, 부분품 또는 이들을 조합한 것들의 존재 또는 부가 가능성을 미리 배제하지 않는 것으로 이해되어야 한다.
- [0054] 다르게 정의되지 않는 한, 기술적이거나 과학적인 용어를 포함해서 여기서 사용되는 모든 용어들은 본 발명이 속하는 기술 분야에서 통상의 지식을 가진 자에 의해 일반적으로 이해되는 것과 동일한 의미를 가지고 있다. 일반적으로 사용되는 사전에 정의되어 있는 것과 같은 용어들은 관련 기술의 문맥 상 가지는 의미와 일치하는 의미를 가지는 것으로 해석되어야 하며, 본 출원에서 명백하게 정의하지 않는 한, 이상적이거나 과도하게 형식적인 의미로 해석되지 않는다.
- [0056] 본 발명의 1차형 구동기에 대한 선형기반의 강건 입력성형기는 ZVD 입력성형기에 기반으로 개발한 것이며, ZVD 입력성형기는 다음과 같이 간략하게 요약된다.

수학식 1

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

[0057]

[0058] 여기서 T는 유연시스템의 주기, $K=e^{-\zeta\pi/\sqrt{1-\zeta^2}}$ 이다. 이때, $\zeta=0$ 인 경우에 대하여 본 발명의 입력성형기를 설계하였다. ZVD 입력성형기는 계단 입력과 임펄스 시퀀스의 합성을 통해 세 개의 계단 입력 명령 프로파일로 나타나며, 도 1의 이상적인 구동기(Ideal Actuator)를 갖춘 유연 시스템에 적용되는 경우 잔류변위의 크기를 0으로 만든다.

[0059] 여기서 ZVD 입력성형기의 입력 명령이 1차형 구동기(1st-Order Actuator)를 갖춘 유연시스템에 적용되는 경우도 1과 같이 왜곡된 명령으로 인해 입력성형제어 성능이 저하된다. 따라서, 1차형 구동기의 비선형 동적 특성을 고려한 강건한 입력 성형된 명령이 필요하다. 여기서, 1차형 구동기는 비선형 구동기로서, 입력속도가 입력시 응답속도가 선형으로 변경되는 것이 아니라 도 2의 (b)에 도시된 바와 같이 곡선을 이루며 가속 또는 감속이 되는 작동 특성을 나타내는 구동기가 적용된다.

[0060] 명령 설계 절차는 도 2와 같이 입력 명령으로 변환하여 단순화될 수 있다. 이때, 시상수를 설계함에 있어, 1st-order 형태의 입력명령은 ZVD shaper를 기반으로 설계하므로 임펄스의 합은 모터 즉, 구동기 최대 성능이며, 임펄스 크기에 따른 시상수(τ_i)를 고려하거나 모터의 전기적 특성과 물리적 특성을 고려한 시상수(τ_i)를 설정해야 한다. 이때, 가속 시상수는 τ_u , 감가속 시상수는 τ_d 라고 한다.

[0061] 이상적인 ZVD 입력성형기 및 시스템의 주기를 고려하여 도 3에 도시된 입력성형기술 개발의 일반성을 유지하면서 대표적인 유연 시스템인 펜듈럼 시스템(pendulum system)의 페이저 벡터 다이어그램(phasor vector diagram)을 활용하여 분석적인 접근 방식을 제시할 수 있다.

[0062] 펜듈럼 시스템에 대한 하중을 모델링한 방정식은 식(2)과 같다.

수학식 2

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

[0063]

[0064] 여기서 $u(t) = \dot{v}_a(t)$ 로 속도입력 명령이고, L은 시스템 줄 길이, 그리고 g는 중력가속도를 말한다. 이 때 $\theta(t)$ 를 미소 각도로 가정하면, 식 (2)는 라플라스 변환하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

수학식 3

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

[0065]

[0066] 여기서 ω_n 은 펜듈럼 시스템의 고유진동수이고, $V_a(s)$ 는 $v_a(t)$ 를 라플라스 변환한 것이다.

[0067] 시스템의 출력 $\theta(s)$ 는 페이저(phasor) 형태로 나타내기 위해 시스템 입력 $H(s)$ 와 사인 입력(sine input)형태로 나타내면 다음과 같다.

수학식 4

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

[0068]

[0069] 잔류진동에서 입력성형 방법의 핵심은 식 (4)로부터 정상상태 응답 식을 다음과 같이 표현하는 것이다.

수학식 5

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

[0070]

[0071] 잔류 진동이 없으면, 식 (5)에서 $\theta_{ss}(t)$ 의 크기는 0이어야 한다. 따라서 $|V_a(j\omega_n)|$ 은 도 4의 (b)와 같이 입력 성형기의 임펄스 시간에 대한 분할된 명령에 의해 결정될 수 있다. 전체속도 프로파일은 다음과 같이 표현된다.

수학식 6

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

[0072]

[0073] 여기서 $h_i(t)$ 는 도 4의 각 영역의 함수이며, 1차형 구동기의 비선형 동적 특성을 고려하면 식(4)로부터 다음의 수학식과 같이 근사화된다.

수학식 7

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

[0074]

[0075] 여기서, A_i 는 임펄스 크기, V_d 는 구동기의 최대 속도가 될 수 있는 원하는 속도, τ_i 는 임펄스의 시상수이며, 가속 시상수의 각 영역은 $\tau_{u1}, \tau_{u2}, \tau_{u3}$ 이다. vector diagram approach를 위해 식 (7)을 라플라스 변환하여 벡터의 크기와 위상각으로 나타내면 다음과 같다.

수학식 8

$$|V_a(j\omega_n)| = \frac{A_i V_d}{\omega_n \sqrt{(\tau_i \omega_n)^2 + 1}}$$

[0076]

수학식 9

$$\angle V_a(j\omega_n) = \tan^{-1}\left(\frac{1}{\tau_d\omega_n}\right)$$

[0077]

[0078] 식 (5)의 정상상태 응답식과 1차형 구동기 즉, 비선형 구동기의 동적 특성을 고려한 벡터의 크기 식(8)과 위상 각 식(9)를 이용하여 도 4의 각 영역 명력 벡터는 다음과 같이 얻어진다.

수학식 10

$$\vec{V}_1 = \left| \frac{A_1 V_d}{L\omega_n \sqrt{(\tau_{u1}\omega_n)^2 + 1}} \right| \angle \left[\omega_n t_1 - \frac{3}{2}\pi + \tan^{-1}\left(\frac{1}{\tau_{u1}\omega_n}\right) \right]$$

[0079]

수학식 11

$$\vec{V}_2 = \left| \frac{A_2 V_d}{L\omega_n \sqrt{(\tau_{u2}\omega_n)^2 + 1}} \right| \angle \left[\omega_n t_2 - \frac{3}{2}\pi + \tan^{-1}\left(\frac{1}{\tau_{u2}\omega_n}\right) \right]$$

[0080]

수학식 12

$$\vec{V}_3 = \left| \frac{A_3 V_d}{L\omega_n \sqrt{(\tau_{u3}\omega_n)^2 + 1}} \right| \angle \left[\omega_n t_3 - \frac{3}{2}\pi + \tan^{-1}\left(\frac{1}{\tau_{u3}\omega_n}\right) \right]$$

[0081]

[0082] [상기 수학식에서,

[0083] ω_n : 펜듈럼 시스템의 고유진동수

[0084] τ_{u1} : 구동기의 시작 동작(t_1)시점의 가속 시상수

[0085] τ_{u2} : 구동기의 시작 동작 이후 가속시점 t_2 의 가속 시상수

[0086] τ_{u3} : 가속시점 t_2 이후 가속시점 t_3 의 가속 시상수

[0087] L: 펜듈럼 시스템의 줄 길이

[0088] A_1, A_2, A_3 : 펄스 시점(t_1, t_2, t_3)의 각각의 임펄스를 의미함]

[0090] 본 발명의 입력성형기를 설계함에 있어 ω 에 대하여 미분하였을 때, 음형태(implicit form)로 나타나 적절한 해결책(exact solution)을 구할 수 없다.

[0091] 도 5는 강건한 입력성형 제어기인 ZVD 입력성형기와 EI 입력성형기의 임펄스 크기가 잔류변위에 미치는 영향을 보여준다.

[0092] 시스템 모델링 오차(system modeling error)가 없을 때, EI 입력성형기의 경우 잔류변위가 허용되지만 ZVD 입력성형기의 경우 잔류변위가 0으로 나타난다. 본 발명의 입력성형기의 경우 잔류변위가 0이 되어야 하므로 $A_1, A_2,$

A₃는 기존의 ZVD 입력성형기의 크기로 가정하였다.

[0093] 식(10)에 대하여 각 명령 벡터를 정규화하면, 페이저 벡터(phasor vector)는 다음과 같이 표현된다.

수학식 13

[0094]
$$\vec{V}_1 = |1| \angle [0]$$

수학식 14

[0095]
$$\vec{V}_2 = |\mu| \angle \left[w_n t_2 - \tan^{-1} \left(\frac{1}{\tau_{u2} w_n} \right) + \tan^{-1} \left(\frac{1}{\tau_{u1} w_n} \right) \right]$$

수학식 15

[0096]
$$\vec{V}_3 = |\lambda| \angle \left[w_n t_3 - \tan^{-1} \left(\frac{1}{\tau_{u3} w_n} \right) + \tan^{-1} \left(\frac{1}{\tau_{u1} w_n} \right) \right]$$

[0097] 여기서

수학식 16

[0098]
$$\mu = \frac{2\sqrt{(\tau_{u1} w_n)^2 + 1}}{\sqrt{(\tau_{u2} w_n)^2 + 1}}$$

수학식 17

[0099]
$$\lambda = \frac{\sqrt{(\tau_{u1} w_n)^2 + 1}}{\sqrt{(\tau_{u3} w_n)^2 + 1}}$$

[0100] 위의 정규화된 페이저 벡터식은 벡터 다이어그램에서 사용될 수 있다. 1차형 구동기의 1st-order를 고려한 본

발명의 압력성형기의 잔류변위의 크기는 도 6에서 세 벡터의 합에 의해 결정된다. 도 6에서 $\left| \vec{V}_1 \right|$ 벡터와 점선 $\left| \vec{V}_2 \right|$ 벡터의 사이각을 α , $\left| \vec{V}_1 \right|$ 벡터와 점선 $\left| \vec{V}_3 \right|$ 벡터의 사이각을 β 라고 할 때 코사인 법칙(cosine law)을 활용하여 결정된 α, β 는 다음과 같다.

수학식 18

[0101]

$$\alpha = \cos^{-1} \left(\frac{|\vec{V}_1| + |\vec{V}_2| - |\vec{V}_3|}{2|\vec{V}_1||\vec{V}_2|} \right) = \cos^{-1} \left(\frac{1}{4} \frac{w_n^4 (4\tau_{u1}^2 \tau_{u3}^2 + \tau_{u2}^2 \tau_{u3}^2 - \tau_{u1}^2 \tau_{u2}^2) + 3w_n^2 \tau_{u1}^2 + 5w_n^2 \tau_{u3}^2 + 4}{(w_n^2 \tau_{u3}^2 + 1) \sqrt{(w_n^2 \tau_{u1}^2 + 1)(w_n^2 \tau_{u2}^2 + 1)}} \right)$$

수학식 19

[0102]

$$\beta = \cos^{-1} \left(\frac{|\vec{V}_1| + |\vec{V}_3| - |\vec{V}_2|}{2|\vec{V}_1||\vec{V}_3|} \right) = \cos^{-1} \left(\frac{1}{2} \frac{w_n^4 (\tau_{u1}^2 \tau_{u2}^2 + \tau_{u2}^2 \tau_{u3}^2 - 4\tau_{u1}^2 \tau_{u3}^2) - w_n^2 (3\tau_{u1}^2 + 3\tau_{u3}^2 - 2\tau_{u2}^2) - 2}{(w_n^2 \tau_{u2}^2 + 1) \sqrt{(w_n^2 \tau_{u1}^2 + 1)(w_n^2 \tau_{u3}^2 + 1)}} \right)$$

[0103]

도 6과 식 14, 15를 활용한 벡터의 위상각은 $\theta_2 = w_n t_2 - \tan^{-1} \left(\frac{1}{\tau_{u2} w_n} \right) + \tan^{-1} \left(\frac{1}{\tau_{u1} w_n} \right) = \pi - \alpha$,
 $\theta_3 = w_n t_3 - \tan^{-1} \left(\frac{1}{\tau_{u3} w_n} \right) + \tan^{-1} \left(\frac{1}{\tau_{u1} w_n} \right) = \pi + \beta$ 로 나타낼 수 있으며, 이를 이용한 임펄스 시간 t_2 와 t_3 는 다음과 같이 결정된다.

수학식 20

[0104]

$$t_2 = \frac{1}{w_n} \left[\pi - \alpha + \tan^{-1} \left(\frac{1}{\tau_{u2} w_n} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{1}{\tau_{u1} w_n} \right) \right]$$

수학식 21

[0105]

$$t_3 = \frac{1}{w_n} \left[\pi + \beta + \tan^{-1} \left(\frac{1}{\tau_{u3} w_n} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{1}{\tau_{u1} w_n} \right) \right]$$

[0106]

정지 동작에 대한 스위치 시간(switch time)은 시작동작과 같은 절차를 가지며, 임펄스 크기의 부호는 비대칭적으로 변경된다. 정지동작에 대한 t_4 은 t_P 에 의해 결정되며, 임펄스 시간 t_5 와 t_6 는 다음과 같다.

수학식 22

[0107]

$$t_5 = t_p + \frac{1}{w_n} \left[\pi - \alpha' + \tan^{-1} \left(\frac{1}{\tau_{d2} w_n} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{1}{\tau_{d1} w_n} \right) \right]$$

수학식 23

[0108]

$$t_6 = t_p + \frac{1}{w_n} \left[\pi + \beta' + \tan^{-1} \left(\frac{1}{\tau_{d3} w_n} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{1}{\tau_{d1} w_n} \right) \right]$$

[0109] 여기서,

수학식 24

$$\alpha' = \cos^{-1} \left(\frac{|\vec{V}_4| + |\vec{V}_5| - |\vec{V}_6|}{2|\vec{V}_4||\vec{V}_5|} \right) = \cos^{-1} \left(\frac{1}{4} \frac{w_n^4 (4r_{d1}^2 r_{d3}^2 + r_{d1}^2 r_{d3}^2 - r_{d1}^2 r_{d2}^2) + 3w_n^2 r_{d1}^2 + 5w_n^2 r_{d3}^2 + 4}{(w_n^2 r_{d3}^2 + 1) \sqrt{(w_n^2 r_{d1}^2 + 1)(w_n^2 r_{d2}^2 + 1)}} \right)$$

수학식 25

$$\beta' = \cos^{-1} \left(\frac{|\vec{V}_4|^2 + |\vec{V}_6|^2 - |\vec{V}_5|^2}{2|\vec{V}_4||\vec{V}_6|} \right) = \cos^{-1} \left(\frac{1}{2} \frac{w_n^4 (r_{d1}^2 r_{d2}^2 + r_{d2}^2 r_{d3}^2 - 4r_{d1}^2 r_{d3}^2) - w_n^2 (3r_{d1}^2 + 3r_{d3}^2 - 2r_{d2}^2) - 2}{(w_n^2 r_{d2}^2 + 1) \sqrt{(w_n^2 r_{d1}^2 + 1)(w_n^2 r_{d3}^2 + 1)}} \right)$$

[0112] [상기 수학식에서,

[0113] ω'' : 펜듈럼 시스템의 고유진동수

[0114] τ_{u1} : 구동기의 시작 동작(t^1)시점의 가속 시상수

[0115] τ_{u2} : 구동기의 시작 동작 이후 가속시점 t^2 의 가속 시상수

[0116] τ_{u3} : 가속시점 t^2 이후 가속시점 t^3 의 가속 시상수

[0117] τ_{d1} : 가속시점 t^3 이후 감속시점 t^4 의 감가속 시상수

[0118] τ_{d2} : 감속시점 t^4 이후 감속시점 t^5 의 감가속 시상수

[0119] τ_{d3} : 감속시점 t^5 이후 정지시점 t^6 의 감가속 시상수를 의미함]

[0121] 본 발명의 입력성형기와 같은 경우, 식 (20), (21)에서 확인할 수 있듯이 가속 시상수 τ_{u1} 와 τ_{u2} 가 같으면 t^2 의 시간이 종래의 ZVD 입력성형기와 동일하게 나타난다. 또한, τ_{u1} 와 τ_{u3} 가 같은 경우에도 기존의 ZVD 입력성형기의 t^3 시간과 동일하게 나타난다. 그러므로 본 발명의 입력성형기는 다음의 조건식을 만족해야 한다.

수학식 26

$$\tau_{u1} \neq \tau_{u2} \neq \tau_{u3}$$

[0123] 또한, 1차형 구동기의 비선형 동적 특성을 고려한 입력기의 명령의 완성도는 식 (7)로부터 각 영역의 정상 상태 오차 2%에 도달하는 시간을 고려하면 다음의 수학식 (27)을 만족하는 것이 바람직하다.

수학식 27

$$t_{i+1} > t_i + 3.9\tau_i$$

여기서, t_i 는 i번째 임펄스 시간, τ_i 는 i번째 임펄스의 시상수를 의미한다. 식 (20) ~ 식 (23)을 활용해 유연시스템의 시작 및 정지 명령에 대한 본 발명의 입력성형기는 다음과 같이 표시된다.

수학식 28

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

위의 식 (28)은 강건한 입력 명령에 대한 합성(convolution)에 의해 비선형 구동기를 사용하여 명령을 생성하는데 사용된다. 본 발명의 입력성형기의 분석 개발 절차를 확장하여 비이상적인 구동기로 다양한 명령을 생성할 수 있다.

이상에서 설명한 본 발명의 1차형 구동기에 대한 선형기반의 강건 입력성형기의 잔류변위 저감 성능은 시상수(τ_i), 지속시간(t_p), modeling error에 대한 강건성에 대하여 평가하였다.

본 발명의 입력성형기의 제어 효과는 도 3의 펜듈럼 시스템을 이용하여 기존의 이상적인 선형(linear) 기반의 입력 명령인 ZVD 입력성형기의 제어효과와 비교 분석하였다. 매틀랩(MATLAB)을 이용한 수치적 시뮬레이션(numerical simulation)에서 기본적인 변수 값은 ZVD 입력성형기를 사용한 실험을 통해 도 7의 속도 변환에 따른 시정수로 나타난다. 시정수는 모터의 전기적, 물리적 특성으로 인해 시상수 크기가 점차 작아지는 결과와 계단 입력의 임펄스 크기에 따른 두번째 시상수(τ_{u2}) 크기가 나머지 시상수보다 더 큰 결과가 나타났다.

도 7의 시상수 실험 결과를 통한 평균적인 시상수와, 본 발명의 입력성형기의 성능 검증을 위해서 시상수(τ_i) 간 100% 차이가 필요한 점을 고려하여 입력성형기를 설계함에 있어 필요한 변수 값을 하기의 표1 및 표2로 설정하였다. 감가속 시상수(τ_a)도 가속 시상수(τ_u)의 크기와 같이 설정하였다.

표 1

변수	L	τ_{u1}	τ_{u2}	τ_{u3}	V_d	t_p
값	0.8m	0.03sec	0.06sec	0.03sec	0.2m/sec	3.5sec

표 2

변수	L	τ_{u1}	τ_{u2}	τ_{u3}	V_d	t_p
값	0.8m	0.09sec	0.06sec	0.03sec	0.2m/sec	3.5sec

도 8은 펄스 지속시간(pulse duration)(t_p)에 따른 ZVD 입력성형기와 본 발명의 입력성형기(ZVD_F)의 잔류변위 변화를 위의 표1, 표2에서 설정한 시상수의 관계로 나누어 나타낸다. 여기서, 긴 커맨드(long command)에서 ZVD 입력성형기와 본 발명의 입력성형기(ZVD_F)의 잔류변위의 크기를 나타낸다.

- [0135] 종래의 ZVD 입력성형기의 경우, 첫번째 시상수(τ_{u1})의 크기가 가장 크고, 두번째 시상수(τ_{u2}), 세번째 시상수(τ_{u3})의 크기로 점차 작아질때, 잔류변위의 크기는 0~2.2cm으로 주기적으로 나타난다. 또한, 두번째 시상수(τ_{u2})의 크기가 가장 크고 첫번째 시상수(τ_{u1}), 세번째 시상수(τ_{u3})의 크기가 같을 때, 잔류변위의 크기는 0~0.6cm으로 주기적으로 나타난다. 반면에, 본 발명의 압력성형기(ZVD_F)는 시상수의 크기와 관계없이 전반적으로 잔류변위의 크기가 0으로 나타난다.
- [0136] 도 9는 줄 길이 L_m 에 따른 ZVD 입력성형기와, 본 발명의 입력성형기(ZVD_F)의 잔류변위 변화를 시상수의 관계에 따라 나누어 나타낸다. 종래의 ZVD 입력성형기의 경우, 첫번째 시상수(τ_{u1})의 크기가 가장 크고, 두번째 시상수(τ_{u2}), 세번째 시상수(τ_{u3})의 크기로 점차 작아질때, 최대 3cm의 가장 높은 잔류변위가 나타나며, 줄 길이가 짧을 때는 불규칙적으로 잔류변위가 나타난다. 또한, 두번째 시상수(τ_{u2})의 크기가 가장 크고 첫번째 시상수(τ_{u1}), 세번째 시상수(τ_{u3})의 크기가 같을 때는 최대 0.7cm의 가장 높은 잔류변위가 나타나며, 첫번째 시상수(τ_{u1})의 크기가 가장 클 때와 비슷한 형태의 잔류변위가 불규칙적으로 나타난다. 반면에, 본 발명의 입력성형기(ZVD_F)는 줄 길이의 변화와 시상수의 크기와 관계없이 전체적으로 0의 잔류변위가 나타난다.
- [0137] 도 10은 두번째 가속 시상수(τ_{u2})와 두번째 감가속 시상수(τ_{a2})에 따른 잔류변위의 크기를 나타낸다. 식(27)과 같이 첫번째 시상수(τ_{u1})의 크기가 가장 크고, 두번째 시상수(τ_{u2}), 세번째 시상수(τ_{u3})의 크기가 같을 때, 도 10에서 확인할 수 있듯이 본 발명의 입력성형기(ZVD_F)의 성능과 종래의 ZVD 입력성형기의 성능이 잔류변위가 0으로 같아지며, 두번째 시상수(τ_{u2})와 두번째 감가속 시상수(τ_{a2})의 크기가 증가할수록 ZVD 입력성형기의 잔류변위는 증가한다. 반면에, 본 발명의 입력성형기(ZVD_F)의 경우, 두번째 시상수(τ_{u2})와 두번째 감가속 시상수(τ_{a2})의 크기와 관계없이 일정하게 0의 잔류변위를 나타낸다.
- [0138] 도 11은 줄 길이 L_m 과 두번째 시상수(τ_{u2})에 따른 본 발명의 입력성형기(ZVD_F)와, 종래의 ZVD 입력성형기의 강건성을 평가한 것이다. 본 발명의 입력성형기(ZVD_F)의 경우, 줄 길이와 두번째 시상수의 시스템 모델링 오차(system modeling error)가 없을 때 잔류변위의 크기는 0이며, 오차가 증가할수록 잔류변위의 크기가 증가한다. 종래의 ZVD 입력성형기의 경우, 줄 길이의 오차가 없을 때도 잔류변위의 크기가 1.2cm 크기가 나타나며, 오차가 증가할 때도 잔류변위의 크기가 유지된다. 이때, ZVD 입력성형기는 두번째 시상수의 오차에는 영향을 받지 않으며 줄 길이의 오차에 따른 잔류변위의 변화가 나타난다.
- [0139] 한편, 본 발명의 입력성형기를 설계함에 있어 시상수 크기에 따른 영향을 미칠 수 있는 모터의 전기적, 물리적 특성을 고려하여 잔류변위 저감 성능과 강건성을 평가한다. 종래의 ZVD 입력성형기를 기반으로 모터의 전기적, 물리적 특성을 고려한 시상수는 표2와 같이 첫번째 시상수(τ_{u1})의 크기가 가장 크고, 두번째 시상수(τ_{u2}), 세번째 시상수(τ_{u3}) 순서로 점차 작아지게 설정하였으며, 기존의 이상적인 선형(linear) 기반의 입력 명령인 ZVD 입력성형기의 제어 효과와 비교한다.
- [0140] 도 12는 첫번째 시상수(τ_{u1})와 지속시간(t_p)에 따른 본 발명의 입력성형기(ZVD_F)와, 종래의 ZVD 입력성형기의 잔류변위의 크기를 나타낸다. 종래의 ZVD 성형기의 경우, 도 7과 같이 지속시간에 따라 주기적인 잔류변위가 나타나며, 첫번째 가속 시상수에 따라 잔류변위의 크기가 점차 증가한다. 반면, 본 발명의 입력성형기(ZVD_F)의 경우, 지속시간과 첫번째 가속 시상수의 변화에 관계없이 잔류변위의 크기가 전반적으로 0으로 나타난다.

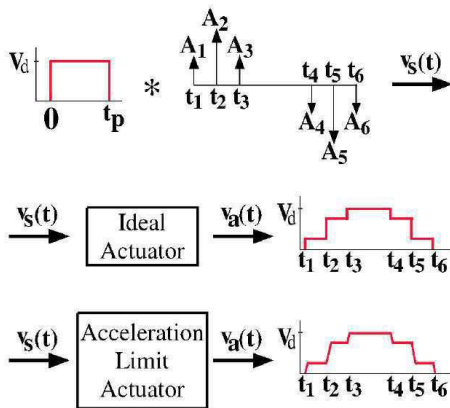
- [0141] 도 13은 줄 길이 L_m 과 첫번째 시상수(τ_{u1})에 따른 본 발명의 입력성형기(ZVD_F)와 종래의 ZVD 성형기의 강건성을 평가한 것이다. 본 발명의 입력성형기(ZVD_F)의 경우 줄 길이와 두번째 시상수의 시스템 모델링 오차(system modeling error)가 없을 때 잔류변위의 크기는 0이며, 오차가 증가할수록 잔류변위의 크기가 증가한다. 종래의 ZVD 입력성형기의 경우, 줄 길이의 오차가 없을 때도 잔류변위의 크기가 0.9~1.2cm 크기가 나타나며, 오차가 증가할때도 잔류변위의 변화가 나타난다. 이때, ZVD 입력성형기는 두번째 시상수의 오차에는 영향을 받지 않으며, 줄 길이의 오차에 따라 잔류변위의 변화가 나타난다.
- [0142] 상술된 비교실험 결과에 따라, 본 발명의 입력성형기(ZVD_F)는 종래의 ZVD 입력성형기보다 더 강건하고, 잔류변위 제어 성능이 우수함을 보인다.
- [0144] 아울러 본 발명의 입력성형기의 성능 확인을 위해 도 14와 같은 미니 브리지 크레인(mini-bridge crane)을 활용해 실험적 검증을 실시하였다.
- [0145] 도 15는 실험 검증에 활용된 미니 브리지 크레인을 구성하는 하드웨어 및 소프트웨어 구성 요소를 나타낸다. 하드웨어 구성요소에서 PLC(Programmable Logic Controller)는 제안된 알고리즘을 수행하기 위해 무선 로컬 영역 네트워크에 의해 컴퓨터에 연결되고 PLC에 의해 생성된 속도 명령은 브리지(bridge), 트롤리(trolley) 모터 드라이버로 전송된다. 드라이브는 PLC에서 들어오는 명령을 모터의 속도 설정 지점으로 사용한다. 모터 드라이브는 synchronous AC 모터를 사용하며 통신 모듈 및 모터 용 제어드라이버로 구성된다. 소프트웨어 구성 요소인 CFC, SCL 그리고 WinCC 소프트웨어는 실험 데이터를 업로드 및 다운로드하는 시스템 운영 프로그램에 사용된다. VS 720 계열의 비전 센서는 Spectation 소프트웨어를 통해 작성된 비전 프로그램으로 페이로드(payload) 진동의 크기를 측정하는데 사용된다.
- [0146] 구동기의 불균형 가속 및 제동을 고려한 명령을 가능한 정확하게 추적하기 위해 모터 제어 드라이버에서 p gain과 가속 및 제동을 조정하였다. 본 성능 평가 실험에서 p gain은 0.25 그리고 i gain은 10ms로 시스템을 설정하였다.
- [0147] 도 16은 입력한 명령과 실제 미니 브리지 크레인에서 실행하는 명령의 오차가 $\pm 2\text{cm/s}^2$ 범위 내로 나타남을 보여준다. 이 실험 장치에서 본 발명의 입력성형기(ZVD_F)의 설계 변수는 임펄스 크기를 고려한 표1과, 모터의 물리적, 전기적 특성을 고려한 표2로 설정하였다. 입력성형기의 제어 성능은 수치적 및 실험적 관점에서 ZVD 입력성형기의 제어성능과 비교한다. 속도 명령의 정확도는 실험 장치에 의해 생성된 속도명령의 오차가 잔류 변위에 영향을 미치는 도 16을 통해 도 17로 나타난다. 본 발명의 입력성형기는 ZVD 입력성형기와 달리 잔류 변위 감소에서 더 나은 성능이 나타나지만 약간의 오차가 발생된다.
- [0148] 도 18은 본 발명의 입력성형기(ZVD_F)와 ZVD 입력성형기의 줄 길이에 대한 강건성을 시상수의 크기에 따라 나누어 비교한 그래프이다. 본 발명의 입력성형기(ZVD_F)의 경우, 모델링 오차(modeling error)가 없을 때 시상수의 크기와 관계없이 잔류변위가 0으로 나타나며, ZVD 입력성형기의 경우, 전반적으로 시상수의 크기가 점점 줄어들 때, 잔류 변위의 크기가 가장 크게 나타나며, 두번째 시상수(τ_{u2})의 크기가 크고 나머지 시상수가 같을 때, 0.4cm의 잔류 변위 크기가 나타난다. 같은 구간을 기준으로 보았을때, 본 발명의 입력성형기(ZVD_F)의 경우, 종래의 ZVD 입력성형기보다 시스템 모델링 오차(system modeling error)에 대하여 강건함을 보여준다. 실험 결과 대부분 시뮬레이션 결과를 따라 강건성을 보이지만, 약간의 오차가 있는 부분은 도 16의 실제 명령에 대한 오차에 의해 생성된 것이다.
- [0149] 도 19는 본 발명의 입력성형기(ZVD_F)와 ZVD 입력성형기의 첫번째 시상수(τ_{u1})에 대해서 강건성을 비교한 그래프이다. 본 발명의 입력성형기(ZVD_F)의 경우, 시스템 모델링 오차(system modeling error)가 없을 때, 잔류 변위가 0으로 나타나며, 모델링 오차(modeling error)의 증가와 감소에 따라 잔류변위가 점점 증가한다. 반면에, ZVD 입력성형기의 경우, 시상수의 모델링 오차(modeling error)에 관계없이 일정하게 잔류변위가 유지되고 있다. 실험결과 전반적으로 수치적 시뮬레이션(numerical Simulation)의 형태는 비슷하게 나타나지만 약간의 오차가 발생하는 부분은 도 16의 velocity error에 따라 생기는 오차와 실제 크레인에서 미세한 충격이나 공기의 움직임에 의해 나타난다. ZVD 입력성형기의 경우, 최대 잔류변위는 1.2cm까지 나타나며, 전반적으로 1cm의 잔류변위가 나타난다.

[0150] 도 20은 본 발명의 입력성형기(ZVD_F)와 ZVD 입력성형기의 두번째 시상수(τ_{u2})에 대해서 강건성을 비교한 그래프이다. 도 19와 마찬가지로, 본 발명의 입력성형기(ZVD_F)의 경우, 시스템 모델링 오차(system modeling error)가 없을 때, 잔류 변위가 0으로 나타나며, 모델링 오차(modeling error)의 증가와 감소에 따라 잔류변위가 점점 증가한다. 반면에, ZVD 입력성형기의 경우, 시상수의 모델링 오차(modeling error)에 관계없이 일정하게 잔류변위가 유지되고 있다. 잔류변위의 크기는 수치적 시뮬레이션(numerical Simulation)과 비슷하게 나타나지만 도 16의 velocity error에 따라 약간의 오차가 발생한다. ZVD 입력성형기의 경우, 최대 잔류변위는 0.5cm까지 나타나며, 전반적으로 0.4cm의 잔류변위가 나타난다.

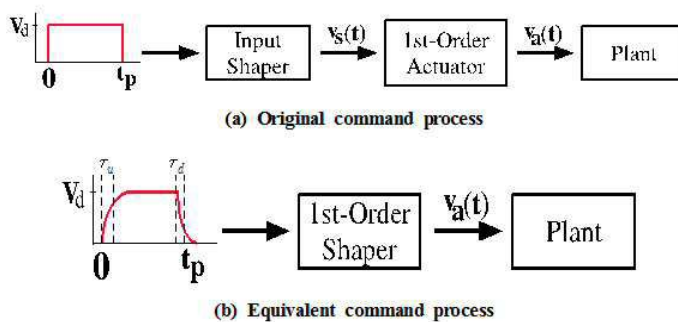
[0152] 제시된 실시예들에 대한 설명은 임의의 본 발명의 기술분야에서 통상의 지식을 가진 자가 본 발명을 이용하거나 또는 실시할 수 있도록 제공된다. 이러한 실시예들에 대한 다양한 변형들은 본 발명의 기술 분야에서 통상의 지식을 가진자에게 명백할 것이며, 여기에 정의된 일반적인 원리들은 본 발명의 범위를 벗어남이 없이 다른 실시예들에 적용될 수 있다. 그리하여, 본 발명은 여기에 제시된 실시예들로 한정되는 것이 아니라, 여기에 제시된 원리들 및 신규한 특징들과 일관되는 최광의의 범위에서 해석되어야 할 것이다.

도면

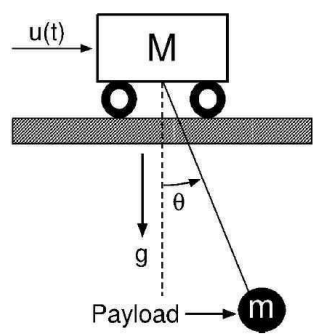
도면1



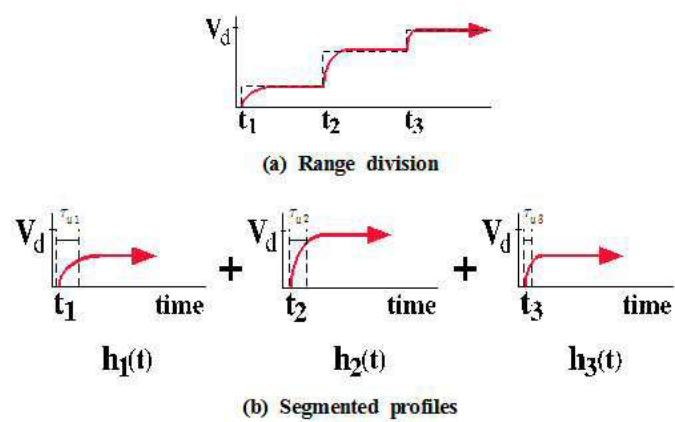
도면2



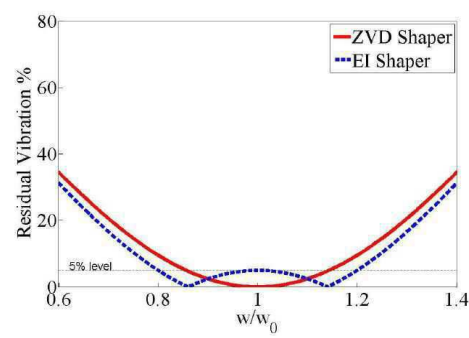
도면3



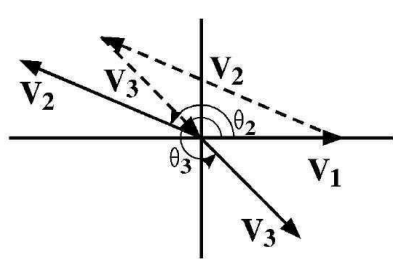
도면4



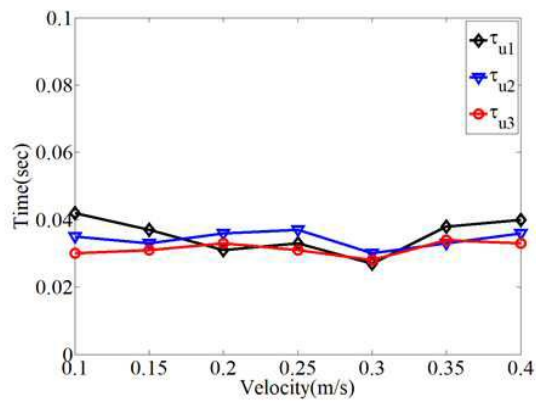
도면5



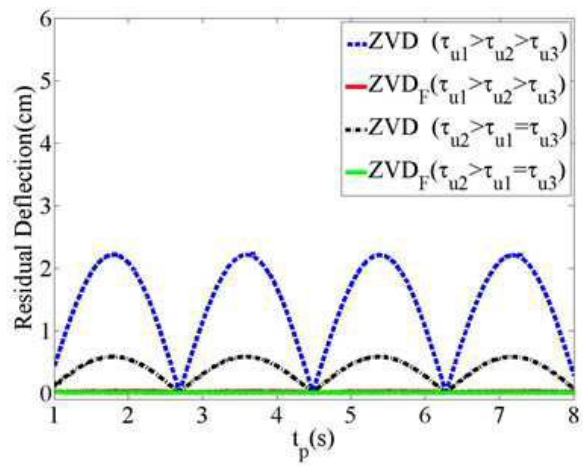
도면6



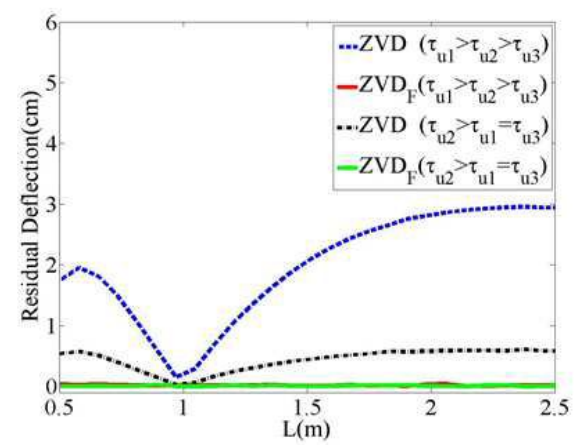
도면7



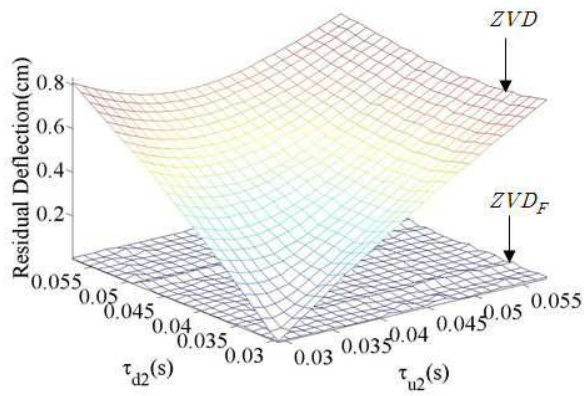
도면8



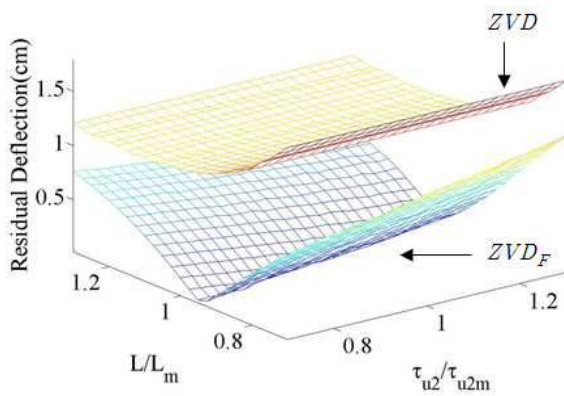
도면9



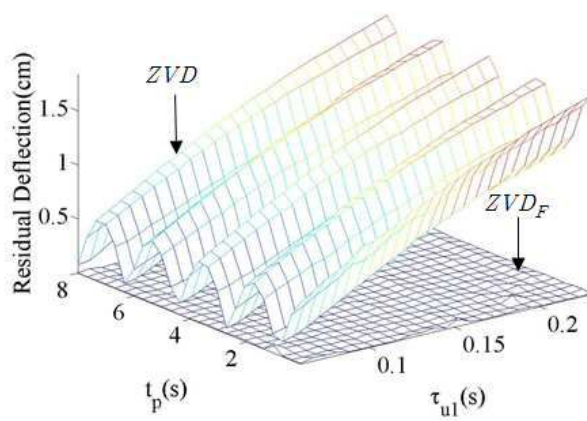
도면10



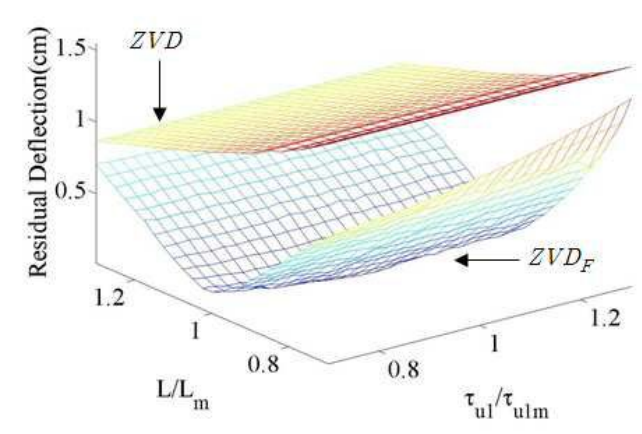
도면11



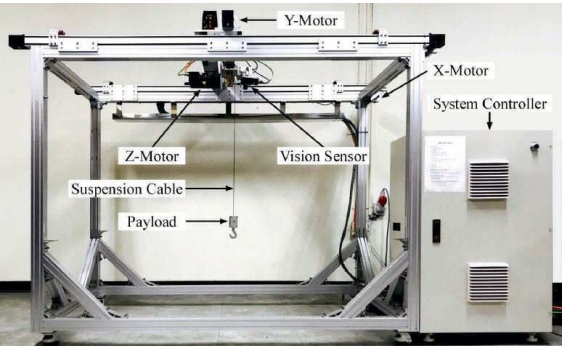
도면12



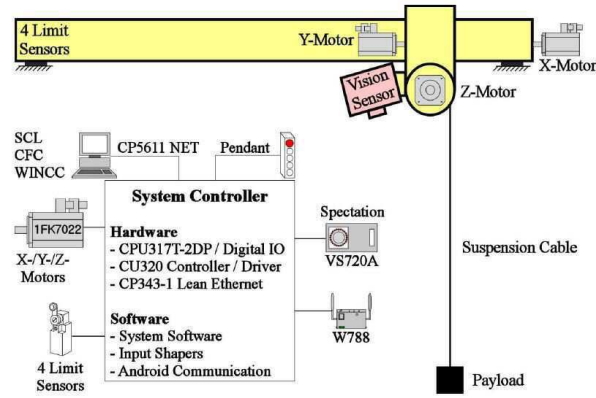
도면13



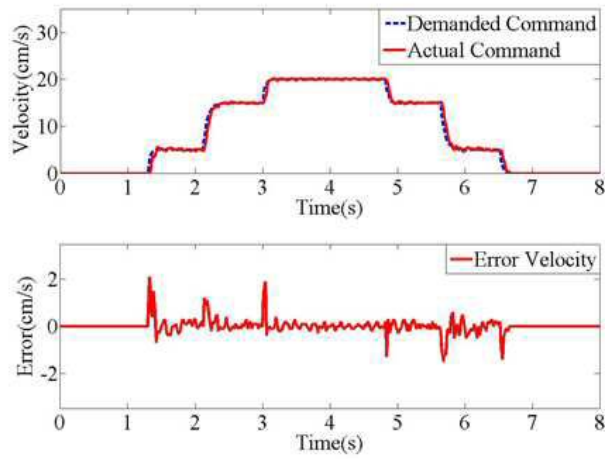
도면14



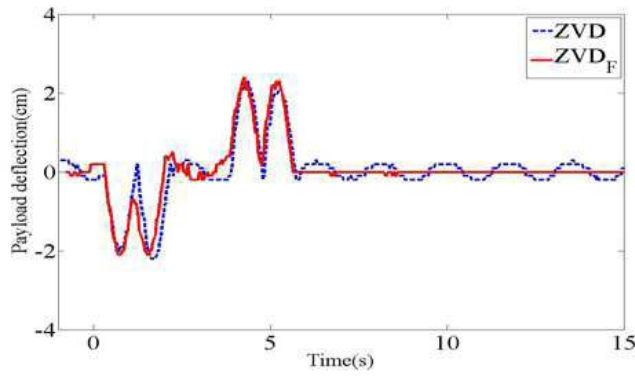
도면15



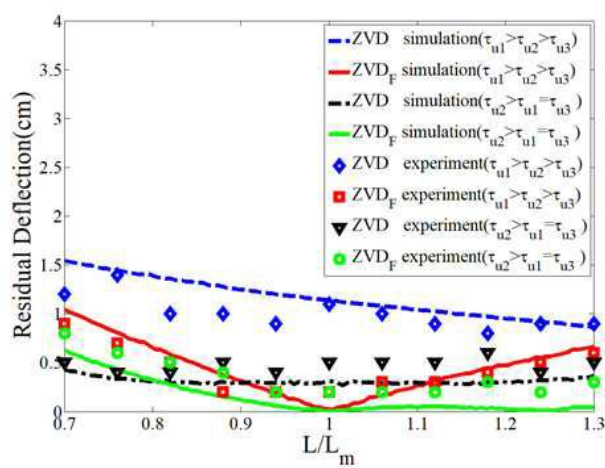
도면16



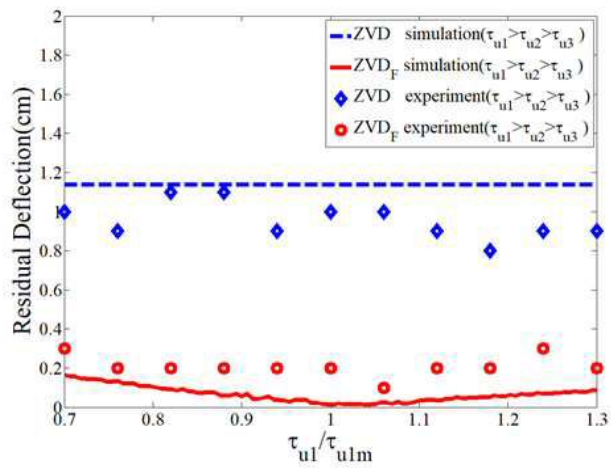
도면17



도면18



도면19



도면20

