



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2015-0093998

(43) 공개일자 2015년08월19일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)

G05D 19/00 (2006.01) F16F 15/00 (2006.01)

(21) 출원번호 10-2014-0014716

(22) 출원일자 2014년02월10일

심사청구일자 2014년02월10일

(71) 출원인

조선대학교산학협력단

광주광역시 동구 필문대로 309 (서석동)

(72) 발명자

성윤경

광주광역시 동구 필문대로 309 (서석동)

민윤상

광주광역시 남구 용대로183번안길 5-11 (방림동)

(74) 대리인

특허법인충정

전체 청구항 수 : 총 5 항

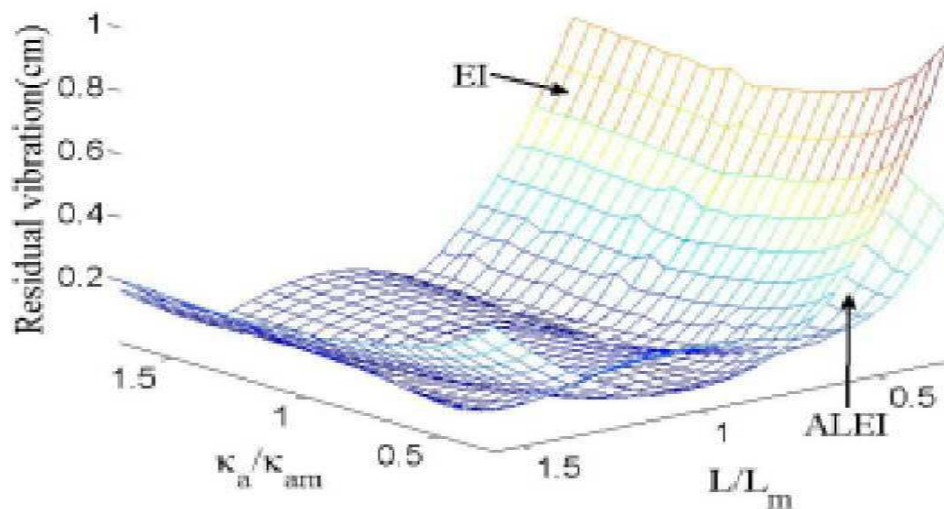
(54) 발명의 명칭 가속도 제한된 유연시스템에 대한 허용 잔류변위를 활용한 강건 입력성형 제어방법

(57) 요약

본 발명은 가속도 제한된 유연시스템에 대한 허용 잔류변위를 활용한 강건 입력성형 제어방법에 관한 것으로서, 기존의 linear 기반의 입력성형 방법을 활용할 때 도면 6 과같이 가속도제한 구동기를 거치면서 명령이 ramp형태로 왜곡되는 현상이 나타나며 이에 따라 시스템의 잔류변위저감성능 및 강건성이 감소한다. 이와 같은 문제 해결

(뒷면에 계속)

대표도 - 도12



을 위해 유연시스템의 운동에서 Pendulum System의 전달함수를 이용하여 페이저(phasor) 벡터의 형태로 나타낸 잔류변위에 대한 변위 벡터를 이용한 펄스 시점(t_p)에 따른 각각의 임펄스 A_1 과 A_2 및 A_3 에 대한 벡터, , 를 구하고, 상기 세 벡터를 이용하여 상기 유연시스템의 운동 중의 잔류 진동 감소를 위한 임펄스의 시간 t_2 와 t_3 를 다음과 같은 수학적식으로 계산하며, 상기와 같은 방법으로 유연시스템의 운동 후의 잔류 진동 감소를 위한 임펄스의 시간 t_5 와 t_6 를 다음과 같은 수학적식으로 구하여, 상기 임펄스 시간 t_2 , t_3 , t_5 및 t_6 를 활용하여 가속도 제한 형태의 속도 명령인 ramped step과의 convolution을 통해 새로 성형된 명령을 입력 커맨드로 활용하여 가속도가 제한된 상기 유연시스템의 운동을 위한 입력 커맨드에 활용하여 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

명세서

청구범위

청구항 1

유연시스템의 운동에서 Pendulum System의 전달함수를 이용하여 페이저(phasor) 벡터의 형태로 나타낸 잔류변위 $\vec{V}_1$ 에 대한 변위 벡터를 이용한 펄스 시점(t_p)에 따른 각각의 임펄스 A_1 과 A_2 및 A_3 에 대한 벡터 $\vec{V}_2$, $\vec{V}_3$ 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, 상기와 같은 방법으로 유연시스템의 운동 후의 잔류 진동 감소를 위한 임펄스의 시간 t_5 와 t_6 를 다음과 같은 수학식으로 구하여,

$$t_2 = \frac{1}{\omega_n} \left\{ \pi - \cos^{-1} \left(\frac{1}{2} \frac{|\vec{V}_2| + V_{\lim} |\vec{V}_{us}|}{|\vec{V}_3|} \right) - \frac{V_d \omega}{2} (A_2 - A_1) \right\}$$

$$t_3 = \frac{2}{\omega_n} \left\{ \pi - \cos^{-1} \left(\frac{1}{2} \frac{|\vec{V}_2| + V_{\lim} |\vec{V}_{us}|}{|\vec{V}_3|} \right) \right\}$$

$$t_4 = t_p$$

$$t_5 = t_4 + \frac{1}{\omega_n} \left\{ \pi - \cos^{-1} \left(\frac{1}{2} \frac{|\vec{V}_5| + V_{\lim} |\vec{V}_{us}|}{|\vec{V}_6|} \right) - \frac{V_d \omega}{2} (A_5 - A_4) \right\}$$

$$t_6 = t_4 + \frac{2}{\omega_n} \left\{ \pi - \cos^{-1} \left(\frac{1}{2} \frac{|\vec{V}_5| + V_{\lim} |\vec{V}_{us}|}{|\vec{V}_6|} \right) \right\}$$

상기 t_2 , t_3 , t_5 및 t_6 를 가속도가 제한된 상기 유연시스템의 운동을 위한 입력 커맨드에 활용하여 잔류 진동을 감소하도록 한 것을 특징으로 하는 가속도 제한된 유연시스템에 대한 허용 잔류변위를 활용한 강건 입력성형 제어방법.

청구항 2

제1항에 있어서,

상기 벡터 $\vec{V}_1$, $\vec{V}_2$, $\vec{V}_3$ 는 임펄스로 인한 pendulum에 정상상태 응답에 대한 변위의 크기와 위상각을 나타내는 다음의 벡터,

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

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

청구항 3

제2항에 있어서,

상기 벡터 $\vec{V}_i$ 를 통해 구해진 벡터 $\vec{V}_1$, $\vec{V}_2$, $\vec{V}_3$ 의 크기와 위상각은,

$$\vec{V}_1 = \left| \sin\left(\frac{1}{2} \frac{\omega_n V_d A_1}{\kappa_a}\right) \right| \angle [0]$$

$$\vec{V}_2 = \left| \sin\left(\frac{1}{2} \frac{\omega_n V_d A_2}{\kappa_a}\right) \right| \angle \left[\omega_n t_2 + \frac{1}{2} \frac{\omega_n V_d}{\kappa_a} (A_2 - A_1) \right]$$

$$\vec{V}_3 = \left| \sin\left(\frac{1}{2} \frac{\omega_n V_d A_3}{\kappa_a}\right) \right| \angle \left[\omega_n t_2 + \frac{1}{2} \frac{\omega_n V_d}{\kappa_a} (A_3 - A_1) \right]$$

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

청구항 4

제1항 내지 제3항에 있어서,

상기 t_2 , t_3 , t_5 및 t_6 를 나타내는 t_i 가 항상 실수값을 가지도록 상기 t_3 , t_6 의 식에서 $\cos^{-1}$ 항은 -1과 1 사이의 값을 가지도록 한 것을 특징으로 하는 가속도 제한된 유연시스템에 대한 허용 잔류변위를 활용한 강건 입력성형 제어방법.

청구항 5

제1항 내지 제3항에 있어서,

다음의 수학적식,

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

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

발명의 설명

기술분야

[0001]

본 발명은 가속도 제한된 유연시스템에 대한 허용 잔류변위를 활용한 강건 입력성형 제어방법에 관한 것으로서, 상세히는 기존의 linear 기반의 입력성형 제어 방법을 활용할 때 도면 6 과같이 가속도제한 구동기를 거치면서 명령이 ramp형태로 왜곡 되는 현상이 나타나며 이에 따라 시스템의 잔류변위의 저감능력이 감소한다. 이와 같은 문제 해결을 위해 구동기 드라이브로 인한 가속도 제한을 갖는 유연시스템의 잔류변위 저감을 위해 상기 유연시스템의 운동에 따른 벡터를 이용하여 잔류변위의 감소를 위한 임펄스 시간을 계산하고, 이를 상기 유연시스템의 운동을 위한 입력 커맨드에 활용하도록 한 가속도 제한된 유연시스템에 대한 허용 잔류변위를 활용한 강건 입력성형제어 방법에 관한 것이다.

배경기술

[0002]

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

[0003]

산업 현장의 입력 성형방법들은 보다 설계변수에 대하여 강건성을 요구하게 되었으며 그에 관한 연구들이 진행되어 왔다. 고유 주파수의 오차에 대한 강건성을 위하여 Singer는 기존의 임펄스 두 개를 이용한 Zero Vibration(ZV) 입력성형기의 고유 주파수를 미분한 식을 이용한 임펄스 3개 형태의 Zero Vibration Derivate(ZVD) 입력성형기를 개발하였다. 하지만 이 솔루션의 경우 역시 linear system theory를 기반으로 하고 있어 실제의 산업현장에서는 성능 감소가 일어난다. Singhose, Seering과 Singer는 잔류변위 식을 잔류변위 벡터로 나타내어 vector diagram을 이용하여 sensitivity curve에서 hump 형태의 Extra Insensitivity(EI) 입력성형기를 제시하였다. EI 입력성형기는 원하는 잔류변위를 허용하는 대신 강건성을 향상시킨 것으로 기존의 ZVD 입력성형기와 같은 shaper duration을 가지면서 일정 허용 범위 안에서 보다 modeling error에 대한 강건함을 보인다. 하지만 이 솔루션 역시 가속도 제한은 고려되지 않아 실제 산업현장에서 활용시의 잔류변위의 성능 감소가 나타난다.

[0004]

Singhose, Derezinski와 Singer는 reaction jet시스템에서 잔류변위의 식을 이용하여 sensitivity curve의 hump 형태의 원하는 잔류변위를 허용하는 대신 강건성을 향상시킨 single 및 multi modes의 EI 입력성형기를 최적화를 이용하여 제시하였다. 하지만 이 경우 가속도 제한이 고려되지 않았으며 최적화 방법으로 제시된 솔루션이기 때문에 실시간 구현에 어려움이 있다.

[0005]

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

[0006]

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

[0007]

구동기와 관련한 성능저하에 관한 연구들이 제안한 Lawrence는 선형 입력성형제어기에 비선형 구동기의 영향으로 발생하는 가속도 및 감속도에 의한 시간지연을 고려하여 잔류변위 저감 성능을 개선한 비선형 입력성형제어기를 개발하였다. 산업 현장의 비선형 구동기의 동적특성을 고려한 입력성형제어기 설계에 필요한 정확한 변수가 필요하다. Danielson은 구동기의 가속도 제한을 고려하여 최적화 방법을 제시하였다. 하지만 최적화 방법은

실제 시스템에 적용하는데 계산시간이 많이 걸리기 때문에 실제 적용에는 다소 어려움이 있다.

[0008] 가속도 제한에 있어 실제 산업현장의 구동기는 드라이브에 의해 가속도 및 감속도의 제한을 두고 있으며 일반적인 구동기의 동특성을 가장 간단히 근사화한 형태이다.

선행기술문헌

특허문헌

[0009] (특허문헌 0001) 한국 등록특허공보 제10-0919890호

발명의 내용

해결하려는 과제

[0010] 본 발명은 상기한 바와 같은 제반 문제점을 개선하기 위해 안출된 것으로서, 그 목적은 구동기의 동특성 중 가속도 제한을 고려하여 허용 잔류변위를 활용한 유연시스템의 정확한 입력성형 제어방법을 제시한 것으로, Pendulum system을 통한 응답식을 통해 phasor 형태의 벡터로 계산하여 나타내고, 이렇게 계산된 phasor vector를 vector diagram approach을 활용하여, 유연시스템의 임펄스 크기와 시간을 구하여 가속도제한으로 인한 ramped step과 convolution을 통해 얻어진 입력 커맨드를 유연시스템에 적용하도록 한 일정한 잔류변위를 허용하는 hump 형태의 입력성형기인 Acceleration Limits Extra-Insensitivity(ALEI) 입력성형기의 입력성형 제어방법을 제공함에 있다.

[0011] 다른 목적은 numerical simulation을 통해 입력성형기의 잔류변위와 강건성의 성능평가를 하고, 입력성형기들을 mini-bridge crane을 통한 감도, 잔류변위 실험 결과를 통해 성능 검증을 하도록 한 가속도 제한된 유연시스템에 대한 허용 잔류변위를 활용한 강건 입력성형 제어방법을 제공함에 있다.

과제의 해결 수단

[0012] 상기한 바와 같은 목적을 달성하기 위해 본 발명의 가속도 제한된 유연시스템에 대한 허용 잔류변위를 활용한 강건 입력성형 제어방법은, 유연시스템의 운동에서 Pendulum System의 전달함수를 이용하여 페이저(phasor) 벡터의 형태로 나타낸 잔류변위에 대한 변위 벡터를 이용한 펄스 시점(t_p)에 따른 각각의 임펄스 A_1 과 A_2 및 A_3 에

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_2 와 t_3 를 다음과 같은 수학식으로 계산하며, 상기와 같은 방법으로 유연시스템의 운동 후의 잔류 진동 감소를 위한 임펄스의 시간 t_5 와 t_6 를 다음과 같은 수학식으로 구하여,

$$t_2 = \frac{1}{\omega_n} \left\{ \pi - \cos^{-1} \left(\frac{1}{2} \frac{|\overrightarrow{V_2}| + V_{\lim} |\overrightarrow{V_{us}}|}{|\overrightarrow{V_3}|} \right) - \frac{V_d \omega}{2} (A_2 - A_1) \right\}$$

$$t_3 = \frac{2}{\omega_n} \left\{ \pi - \cos^{-1} \left(\frac{1}{2} \frac{|\overrightarrow{V_2}| + V_{\lim} |\overrightarrow{V_{us}}|}{|\overrightarrow{V_3}|} \right) \right\}$$

$$t_4 = t_p$$

$$t_5 = t_4 + \frac{1}{\omega_n} \left\{ \pi - \cos^{-1} \left(\frac{1}{2} \frac{|\overrightarrow{V_5}| + V_{\lim} |\overrightarrow{V_{us}}|}{|\overrightarrow{V_6}|} \right) - \frac{V_d \omega}{2} (A_5 - A_4) \right\}$$

$$t_6 = t_4 + \frac{2}{\omega_n} \left\{ \pi - \cos^{-1} \left(\frac{1}{2} \frac{|\overrightarrow{V_5}| + V_{\lim} |\overrightarrow{V_{us}}|}{|\overrightarrow{V_6}|} \right) \right\}$$

상기 t_2 , t_3 , t_5 및 t_6 를 가속도가 제한된 상기 유연시스템의 운동을 위한 입력 커맨드에 활용하여 잔류 진동을 감소하도록 한 것을 특징으로 하고 있다.

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

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

를 통해 구하는 것이 바람직하다.

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

$$\overrightarrow{V_1} = \left| \sin\left(\frac{1}{2} \frac{\omega_n V_d A_1}{\kappa_a}\right) \right| \angle [0]$$

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

$$\overrightarrow{V_3} = \left| \sin\left(\frac{1}{2} \frac{\omega_n V_d A_3}{\kappa_a}\right) \right| \angle \left[\omega_n t_2 + \frac{1}{2} \frac{\omega_n V_d}{\kappa_a} (A_3 - A_1) \right]$$

인 것이 바람직하다.

또 상기 t_2 , t_3 , t_5 및 t_6 를 나타내는 t_i 가 항상 실수값을 가지도록 상기 t_3 , t_6 의 식에서 $\cos^{-1}$ 항은 -1과 1 사이의 값을 가지도록 하는 것이 바람직하다.

또 다음의 수학적,

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

[0030]에 의해 임펄스의 간격이 원하는 속도에서 가속도(속도 감소시에는 감속도)로 나눈 값보다 크도록 하는 것이 바람직하다.

발명의 효과

[0031] 본 발명의 가속도 제한된 유연시스템에 대한 허용 잔류변위를 활용한 강건 입력성형 제어방법에 의하면, 입력성형제어기의 성능 평가를 위해 설계 변수에 대한 잔류변위의 크기, modeling error에 대한 감도를 기존의 입력성형기와 비교 하였을 때 잔류 진동의 감소 성능 비교에서 성능 향상을 보였으며, 감도 역시 보다 modeling error에 강건함을 보여주는 효과가 있다.

도면의 간단한 설명

[0032] 도 1은 Flexible System 중의 하나인 Pendulum System의 개념도
 도 2는 ZV 입력성형기의 속도의 분리 개념도
 도 3은 t_p 에서 EI 입력성형기의 잔류변위 그래프
 도 4는 EI Short 커맨드의 convolution process
 도 5는 EI Long 커맨드의 convolution process
 도 6은 EI 입력성형기의 왜곡된 커맨드
 도 7은 본 발명의 입력성형 제어방법에 따른 ALEI 입력성형기의 속도의 분리 개념도
 도 8은 본 발명의 입력성형 제어방법에 따른 ALEI 입력성형기의 벡터 다이어그램
 도 9는 본 발명의 입력성형 제어방법에 따른 ALEI 입력성형기의 감도 곡선
 도 10은 t_p 에서 본 발명의 입력성형 제어방법에 따른 ALEI 입력성형기의 잔류변위를 나타내는 그래프
 도 11은 L/L_m 에서 본 발명의 입력성형 제어방법에 따른 ALEI 입력성형기의 감도 진동을 나타내는 그래프
 도 12는 L/L_m and κ_a/κ_{am} 에서 본 발명의 입력성형 제어방법에 따른 ALEI 입력성형기의 감도 진동의 컴퓨터 시뮬레이션을 나타내는 도면
 도 13은 본 발명의 입력성형 제어방법에 따른 ALEI 입력성형기의 시험대를 위한 Mini-Bridge Crane
 도 14는 본 발명의 입력성형 제어방법에 따른 ALEI 입력성형기에 의한 속도 에러의 실험그래프
 도 15는 기존의 EI와 본 발명에 따른 ALEI 입력성형기의 속도 커맨드를 나타내는 그래프
 도 16은 기존의 EI와 본 발명에 따른 ALEI 입력성형기의 Deflection Response를 나타내는 그래프
 도 17은 L/L_m 에서 본 발명의 입력성형 제어방법에 따른 ALEI 입력성형기의 감도를 나타내는 그래프
 도 18은 t_p 에서 본 발명의 입력성형 제어방법에 따른 ALEI 입력성형기의 잔류변위를 나타내는 그래프
 도 19는 κ_a/κ_{am} 에서 본 발명의 입력성형 제어방법에 따른 ALEI 입력성형기의 감도를 나타내는 그래프

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0033] 이하, 본 발명에 따른 가속도 제한된 유연시스템에 대한 허용 잔류변위를 활용한 강건 입력성형 제어방법의 바람직한 실시예를 첨부한 도면을 참조로 하여 상세히 설명한다. 본 발명은 이하에서 개시되는 실시예에 한정되는 것이 아니라 서로 다른 다양한 형태로 구현될 수 있으며, 단지 본 실시예는 본 발명의 개시가 완전하도록 하며 통상의 지식을 가진 자에게 발명의 범주를 완전하게 알려주기 위하여 제공되는 것이다.

[0034] 본 발명에 따른 ALEI 입력성형 제어방법에 있어 기본적인 Flexible System 중 하나인 Pendulum System의 전달함수를 이용하여 정상상태 응답을 구하고 응답을 phasor vector의 형태로 나타내어 잔류변위에 대한 변위 벡터를 나타낸다. 변위벡터는 3절에서 입력성형제어기의 설계시에 사용된다.

[0035] 도 1과 같은 일반적인 pendulum의 모델에 대한 식을 Lagrange equation을 이용하여 계산하면 다음의 수학적 1과

같다.

수학식 1

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

를 미소각 이라 가정하면 상기의 수학식 1은 다음과 같은 수학식 2로 선형화 된다.

수학식 2

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

상기 수학식 1을 라플라스 변환을 통해 응답을 구하면 다음의 수학식 3과 같다. 여기서 가속도 입력 는 속도 입력로 나타나며 라플라스 변환시에 로 치환된다.

수학식 3

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

응답 $\theta(s)$ 는 다음의 수학식 4와 같이 시스템입력 $C(s)$ 와 sine input으로 변형된 식으로 나타낸다.

수학식 4

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

상기의 수학식 4를 steady state response으로 나타내면 다음의 수학식 5로 나타낼 수 있다.

수학식 5

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

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

벡터의 amplitude와 phase로 나타내면, 다음의 수학식 6으로 나타낸다.

수학식 6

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

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

수학식 7

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

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

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

수학식 8

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

여기서 κ_i 는 감속도 또는 감속도로 양의 임펄스일 때는 κ_a , 음의 임펄스일 때는 κ_d 이다, V_d 는 요구되는 속도값이다.

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

수학식 9

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

이 벡터는 임펄스로 인한 pendulum에 정상상태응답에 대한 변위의 크기와 위상각을 나타낸다. 다음의 본 발명의 입력성형 제어방법에 따른 입력성형제어기 개발시에 상기의 수학식 9를 이용한 vector diagram approach를 이용하여 ALEI(Acceleration Limits Extra-Insensitivity) 입력성형기를 제시한다.

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

기존의 EI(Extra-Insensitivity) 입력성형기들의 가속도 제한의 경우 성능 향상을 위해 상기에서 계산된 가속도 제한의 phasor vector를 vector diagram approach를 이용하여 exact shapers를 계산한다.

[0059] 기존의 가속도 제한을 고려한 EI 입력성형기에 있어, 입력성형기의 명령 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 EI 형태의 입력성형기를 개발한다.

[0060] 도 3은 t_p 에 따라 EI의 잔류변위를 나타내었다. 그림에서 보는바와 같이 그래프 상에서 3가지의 구간으로 구분된다. 먼저 I 구간은 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_p 에 따라 주기적인 특성을 보인다는 것이 특징이다.

[0061] EI interference 커맨드는 t_p 가 short 커맨드와 long 커맨드 사이에 위치할 경우 발생된다. 따라서 EI interference 커맨드가 사용되기 위해서는 t_p 가 다음과 같은 수학적 10 및 34의 조건을 만족해야한다.

수학적 10

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

[0062]

수학적 34

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

[0063]

[0064] EI interference 커맨드는 커맨드가 정상상태에 도달하지 않기 때문에 실제 약간의 잔류 변위를 발생시킨다.

[0065] 도 4는 EI의 short 커맨드를 나타내고 있다. EI short 커맨드는 펄스입력과 임펄스 시퀀스의 convolution을 통해 생성되며 세 개의 펄스 형태로 구성된다. 이와 같은 short 커맨드가 사용되기 위해서는 t_p 가 다음과 같은 수학적 11의 조건을 만족해야한다.

수학적 11

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

[0066]

[0067] EI interference 커맨드는 t_p 가 short 커맨드와 long 커맨드 사이에 위치할 경우 발생된다. 따라서 EI interference 커맨드가 사용되기 위해서는 t_p 가 다음과 같은 수학적 12 및 35의 조건을 만족해야한다.

수학식 12

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

수학식 35

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

EI interference 커맨드는 커맨드가 정상상태에 도달하지 않기 때문에 실제 약간의 잔류 변위를 발생시킨다.

도 5는 EI의 long 커맨드를 나타내고 있다. EI long 커맨드는 ramp up과 ramp down에 따라 각기 다른 펄스입력과 임펄스 시퀀스의 convolution을 통해 생성된다. 이와 같은 long 커맨드가 사용되기 위해서는 t_p 가 다음과 같은 수학식 13의 조건을 만족해야한다.

수학식 13

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

다음은 본 발명의 입력성형 제어방법에 따른 ALEI 입력성형기에 대해서 설명한다.

기존의 EI 입력성형기를 가속도 제한이 고려된 solution으로 계산한다.

도 6은 기존의 linear 기반의 EI 입력성형가 가속도제한 구동기를 거치면서 명령이 ramp형태로 왜곡 되는 현상이 나타나며 이에 따라 시스템의 잔류변위저감성능 및 강건성이 감소하여 잔류변위가 발생되고 있음을 보여준다.

여기서 우리는 가속도제한, 강건성, 허용잔류변위를 고려한 입력성형제어방법, 즉, 임펄스 크기에 따른 시간을 결정한다. t_1 을 0, A_i 를 EI 입력성형기의 amplitude로 가정한다. 또한 벡터의 대칭성을 위하여 $t_3=2*t_2$ 의 조건을 가정한다. 도 7 (a)의 실제 속도 명령어를 임펄스 시간에 따라 개별적으로 나누면 도 7 (b)와 같다. 따라서

상기의 수학식 9를 이용하여 각각의 임펄스에 대한 벡터 $\vec{V}_1$, $\vec{V}_2$, $\vec{V}_3$ 는 다음과 같은 수학식 14 내지 수학식 16으로 표현된다.

수학식 14

$$\vec{V}_1 = \left| \frac{2\kappa_a \sin\left(\frac{1}{2} \frac{\omega_n V_d A_1}{\kappa_a}\right)}{L\omega_n^2} \right| \angle \left[\omega_n t_1 + \frac{1}{2} \frac{\omega_n V_d A_1}{\kappa_a} \right]$$

수학식 15

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

수학식 16

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

위의 두 벡터 $\overrightarrow{V_1}$, $\overrightarrow{V_2}$, $\overrightarrow{V_3}$ 의 크기와 위상각을 정리하면 다음과 같은 수학식 17 내지 수학식 19가 되고, 도 8과 같이 나타낼 수 있다.

수학식 17

$$\overrightarrow{V_1} = \left| \sin\left(\frac{1}{2} \frac{\omega_n V_d A_1}{\kappa_a}\right) \right| \angle [0]$$

수학식 18

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

수학식 19

$$\overrightarrow{V_3} = \left| \sin\left(\frac{1}{2} \frac{\omega_n V_d A_3}{\kappa_a}\right) \right| \angle \left[\omega_n t_2 + \frac{1}{2} \frac{\omega_n V_d}{\kappa_a} (A_3 - A_1) \right]$$

본 발명의 입력성형 제어방법에 따른 ALEI 입력성형기를 설계하기 위해서 도 9에서 보여지는 hump 형태의 감도 곡선(sensitivity curve)을 만들기 위해서는 다음과 같이 세 가지의 제약조건이 만족해야한다. 시스템의 고유 주파수와 설계시 추정한 주파수의 비가 1보다 작거나 클 때 잔류변위의 크기가 각각 0이어야 하며, 1과 같을 때

잔류 변위는 unshape일 때의 변위 $\times V_{lim}$ 이어야 한다. 여기서 V_{lim} 은 unshape의 잔류변위의 비율을 나타낸다. 위의 세 가지 조건을 만족하게 되면 hump 형태의 감도 곡선이 나타난다.

$$\frac{\omega}{\omega_{system}} < 1$$

우선 ω_{system} 일 때 잔류 변위는 0이어야 하기 때문에 $\omega = \omega_{lim}$ 일 때 세 벡터를 이용하여 임펄스의 시간 t_2 와 t_3 를 계산하기 위해 vector diagram approach에서 코사인 법칙을 활용하여 잔류 변위가 0일 조건을

찾을 수 있다. 이 식을 $a_1 = (\theta_3 - 2\alpha) - \pi$, $a_2 = \theta_2 - \alpha$ 조건을 이용하여 계산하면 다음과 같은 수학식 20 및 수학식 21이 된다.

수학식 20

$$\cos(2(\theta_2 - \alpha)) = \frac{\overrightarrow{|V_{2l}|^2} - \overrightarrow{|V_{1l}|^2} - \overrightarrow{|V_{3l}|^2}}{2 \overrightarrow{|V_{1l}|} \overrightarrow{|V_{3l}|}}$$

수학식 21

$$\cos(\theta_2 - \alpha) = \frac{\overrightarrow{|V_{1l}|^2} + \overrightarrow{|V_{2l}|^2} - \overrightarrow{|V_{3l}|^2}}{2 \overrightarrow{|V_{1l}|} \overrightarrow{|V_{2l}|}}$$

위의 두 수학식이 각이 두배의 차이가 나므로 삼각 함수 공식을 이용한 $\cos(2\theta) = \cos^2(\theta) - 1$ 을 이용하여 조건식을 계산하면 다음과 같은 수학식 22가 된다.

수학식 22

$$A_1 = A_3$$

$$\frac{\omega}{\omega_{system}} > 1$$

또한 ω_{system} 일 때 역시 잔류 변위는 0이어야 하지만 벡터들의 대칭성의 조건이기 때문에 수학식 22와 같은 결과가 계산된다.

$$\frac{\omega}{\omega_{system}} = 1$$

마지막으로 ω_{system} 일 때의 잔류변위의 크기가 unshape 일 때의 변위 $\times V_{lim}$ 의 크기와 같아야 된다. 이것은 벡터의 합에 의해서 x축 성분과 y축 성분의 각각의 제곱의 합을 제곱근시키면 벡터의 크기가 된다. 따라서 상기의 수학식 22를 대입하여 벡터들의 합을 계산하면 다음과 같은 수학식 23이 된다.

수학식 23

$$\overrightarrow{|V_2|^2} + 4 \overrightarrow{|V_2|} \overrightarrow{|V_3|} \cos(\theta_2) + 4 \overrightarrow{|V_3|^2} \cos^2(\theta_2) = V_{\lim}^2 \overrightarrow{|V_{us}|^2}$$

[0092]

[0093] 위의 수학식 23을 θ_2 에 대하여 계산하면 다음의 수학식 24가 된다.

수학식 24

$$\theta_2 = \pi - \cos^{-1} \left(\frac{1}{2} \frac{\overrightarrow{|V_2|} + V_{\lim} \overrightarrow{|V_{us}|}}{\overrightarrow{|V_3|}} \right)$$

[0094]

[0095] θ_3 는 $t_3=2*t_2$ 의 가정에 의하여 $\theta_3=2\theta_2$, 임펄스의 시간 t_2 와 t_3 는 다음과 같은 수학식 25 및 수학식 26으로 구해진다.

수학식 25

$$t_2 = \frac{1}{\omega_n} \left\{ \pi - \cos^{-1} \left(\frac{1}{2} \frac{\overrightarrow{|V_2|} + V_{\lim} \overrightarrow{|V_{us}|}}{\overrightarrow{|V_3|}} \right) - \frac{V_d \omega}{2} (A_2 - A_1) \right\}$$

[0096]

수학식 26

$$t_3 = \frac{2}{\omega_n} \left\{ \pi - \cos^{-1} \left(\frac{1}{2} \frac{\overrightarrow{|V_2|} + V_{\lim} \overrightarrow{|V_{us}|}}{\overrightarrow{|V_3|}} \right) \right\}$$

[0097]

[0098] 유연시스템의 stop motion의 시작 시간은 t_p 에 의해 결정되며 κ_a 대신 κ_d 를 이용하여 계산하면 된다. 따라서 stop motion의 벡터의 크기는 다음과 같은 수학식 27 내지 수학식 29로 구해진다.

수학식 27

$$\overrightarrow{V_4} = \left| \sin \left(\frac{1}{2} \frac{\omega_n V_d A_1}{\kappa_d} \right) \right| \angle [0]$$

[0099]

수학식 28

$$\overrightarrow{V_5} = \left| \sin \left(\frac{1}{2} \frac{\omega_n V_d A_2}{\kappa_d} \right) \right| \angle \left[\omega_n t_2 + \frac{1}{2} \frac{\omega_n V_d}{\kappa_d} (A_2 - A_1) \right]$$

수학식 29

$$\overrightarrow{V_6} = \left| \sin \left(\frac{1}{2} \frac{\omega_n V_d A_3}{\kappa_d} \right) \right| \angle \left[\omega_n t_2 + \frac{1}{2} \frac{\omega_n V_d}{\kappa_d} (A_3 - A_1) \right]$$

위의 세 벡터를 앞서 계산한 방식과 같은 방법을 이용하여 계산하면 임펄스의 시간 t_5 , t_6 는 다음과 같은 수학식 30 내지 수학식 32로 구해진다.

수학식 30

$$t_4 = t_P$$

수학식 31

$$t_5 = t_4 + \frac{1}{\omega_n} \left\{ \pi - \cos^{-1} \left(\frac{1}{2} \frac{|\overrightarrow{V_5}| + V_{\lim} |\overrightarrow{V_{us}}|}{|\overrightarrow{V_6}|} \right) - \frac{V_d \omega}{2} (A_5 - A_4) \right\}$$

수학식 32

$$t_6 = t_4 + \frac{2}{\omega_n} \left\{ \pi - \cos^{-1} \left(\frac{1}{2} \frac{|\overrightarrow{V_5}| + V_{\lim} |\overrightarrow{V_{us}}|}{|\overrightarrow{V_6}|} \right) \right\}$$

본 발명의 입력성형 제어방법에 따른 ALEI 입력성형기의 경우 t_i 가 항상 실수값을 가져야 한다. 따라서 $\cos^{-1}$ 의 항의 괄호가 -1~1 사이의 값을 가져야 한다. 또한 다음의 수학식 33에서와 같이 임펄스의 간격이 원하는 속도에서 가속도(속도 감소시에는 감속도)로 나눈 값보다 커야 된다. 그 이유는 이 조건을 만족하지 못할 경우 속도 프로파일이 원하는 속도까지 도달하지 못하여 커맨드가 정상상태에 도달하지 못한다.

수학식 33

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

[0107]

[0108]

[0109]

MATLAB[®]을 이용하여 앞에서 개발한 각각의 입력성형기에 대하여 numerical simulation을 진행한다. 본 발명의 입력성형 제어방법에 따른 ALEI 입력성형기의 시뮬레이션을 통해 기존의 EI 입력성형기의 성능 비교를 한다. 시뮬레이션의 기본적인 변수들의 값은 다음과 같이 설정하였다.

표 1

[0110]

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

[0111]

위의 설정된 값은 κ_a 와 κ_d 의 값이 같을 경우 linear 솔루션과 같은 결과를 가지게 되므로 가속도와 감속도의 값을 서로 다른 값으로 설정하였고, 일반적으로 가속도보다 감속도가 크기 때문에 κ_d 를 κ_a 보다 작게 나타내었으며, 실제 모터의 가속도와 감속도는 최대 속도의 2배 이상의 값을 가진다. 이 값을 이용한 simulation은 κ_a , κ_d , t_p 에 대하여 잔류변위 저감 성능과 설계변수 κ_a , κ_d , L에 대한 강건성을 기존의 linear 기반의 입력성형기와 비교하였다.

[0112]

본 발명의 입력성형 제어방법에 따른 ALEI 입력성형기를 분석하면 다음과 같다.

[0113]

본 발명의 입력성형 제어방법에 따른 ALEI 입력성형기의 numerical simulation을 진행한다. 시뮬레이션에 사용된 변수 값은 상기의 표 1과 같이 $\kappa_a=0.5\text{m/s}^2$, $\kappa_d=1\text{m/s}^2$, $t_p=3.5\text{sec}$, $L=0.8\text{m}$, $V_d=0.2\text{m/s}$ 로 설정하였으며 실험에 따라 L, t_p , κ_a 를 변경하면서 실험을 진행하였다.

[0114]

도 10은 t_p 에 대하여 본 발명의 ALEI와 기존의 EI 입력성형기의 step command의 변위에 대한 잔류 변위의 크기의 정도를 나타내고 있다. 사용된 변수 값은 상기의 표 1과 같이 $\kappa_a=0.5\text{m/s}^2$, $\kappa_d=1\text{m/s}^2$, $L=0.8\text{m}$,

$V_d=0.2\text{m/s}$ 로 설정하였으며 $V_{lim}=5\%$ 일 때 본 발명의 ALEI 입력성형기의 경우 0~20% 사이의 잔류변위를 보이는 반면 기존의 EI 입력성형기의 경우 잔류변위가 크게 상승함을 보이고 있다. 이는 가속도 제한의 구동기에서 허용 잔류변위를 제어하는데 오차율이 본 발명의 ALEI 입력성형기의 경우 보다 작아 제어성능이 우수하다.

[0115]

도 11은 각각 기존의 EI와 본 발명의 ALEI 입력성형기의 감도를 보이고 있다. 사용된 변수 값은 상기의 표 1과 같이 $\kappa_a=0.5\text{m/s}^2$, $\kappa_d=1\text{m/s}^2$, $t_p=3.5\text{sec}$, $L=0.8\text{m}$, $V_d=0.2\text{m/s}$ 로 설정하였다. 본 발명의 ALEI 입력성형기의 경우 V_{lim} 값에 따라 $L/L_m=1$ 일 때의 잔류변위의 크기가 증가하고 있다. 하지만 기존의 EI 입력성형기의 경우 V_{lim} 에 따라 변위가 제어되지 않고 있으며 민감도 곡선이 좌우에 0에 닿지 않고 있다. 이는 실제 허용 잔류변위에 따른 변위가 제어되지 않고 있다는 의미이다.

[0116]

도 12는 각각 기존의 EI와 본 발명의 ALEI 입력성형기의 κ_a 와 L에 대하여 감도를 보이고 있다. 사용된 변수 값은 상기의 표 1과 같이 $\kappa_a=0.5\text{m/s}^2$, $\kappa_d=1\text{m/s}^2$, $t_p=3.5\text{sec}$, $L=0.8\text{m}$, $V_d=0.2\text{m/s}$ 로 설정하였다. 본 발명의

ALEI 입력성형기의 경우 κ_a 에 값이 1이 아니더라도 어느 정도의 기존의 EI 입력성형기의 특성인 hump의 특성을 보이고 있다. 하지만 기존의 EI 입력성형기의 경우 변위도 클 뿐만 아니라 κ_a 의 값에 따라 hump특성이 사라졌다.

[0117] Simulation을 통해 잔류변위의 크기와 각각의 변수들의 강건성을 평가한 결과 기존의 이상적인 입력성형기와 비교하여 잔류변위가 줄어들고, 허용 잔류변위에 대해 변위가 제어가 가능해졌으며 강건성 역시 증가함을 보인다. 따라서 본 발명의 ALEI 입력성형기가 기존의 EI 입력성형기보다 가속도 제한의 경우에 성능이 향상되었다.

[0118] 본 발명의 가속도 제한된 입력성형 제어방법에 따른 입력성형기를 다음과 같이 실험장치를 통해 검증하도록 한다.

[0119] 본 발명에서 입력성형제어기들의 잔류변위 저감 성능을 실험적으로 검증하기 위해 도 13의 실험장치를 사용하였다. mini-bridge crane은 Siemens PLC(programmable logic controller)로 구성되어 있고, 이론 검증을 위해 시스템 구동을 위한 pendant와 실험 data의 입출력할 수 있게 프로그램을 개발하였다. 실험장치의 구동에는 절대 엔코더를 사용하는 3개의 servo motor를 사용했고 payload의 흔들림을 측정하기 위해 Siemens VS720x 계열의 intelligent vision sensor를 사용하였다.

[0120] 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 $3.6 \times 10^8 \text{ rad/sec}$ 로 모터 세팅을 하여 생성된 프로파일을 잘 추적할 수 있도록 하였다. 도 14는 실제 가속도 제한 속도 프로파일을 입력한 후 입력한 속도 프로파일과 실제 모터의 속도값을 비교하였다. 실제 나타난 error plot의 경우와 같이 최대 $\pm 2 \text{ cm/sec}^2$ 의 오차는 있으나 명령된 속도 프로파일을 허용범위 안에서 추적하고 있다. intelligent vision sensor를 통해 payload 변위측정을 하였고, MATLAB[®]

software를 통해 측정된 변위를 분석하였다. 실험 변수값은 $\kappa_a=0.5 \text{ m/sec}^2$, $\kappa_d=1 \text{ m/sec}^2$, $t_P=3.5 \text{ sec}$, $L=0.8 \text{ m}$,

$V_d=0.2 \text{ m/s}$ 로 설정하였으며 start-stop motion을 통해 케이블 길이 또는 t_p 을 바꿔가며 잔류변위를 검증하였다.

[0121] 실험 결과는 다음과 같다.

[0122] ramp 형태의 속도 프로파일을 생성하여 mini-bridge crane을 활용해 실험을 진행하였다. 진행시의 변수값은 시뮬레이션과 동일하게 $\kappa_a=0.5 \text{ m/s}^2$, $\kappa_d=1 \text{ m/s}^2$, $t_P=3.5 \text{ sec}$, $L=0.8 \text{ m}$, $V_d=0.2 \text{ m/s}$ 로 설정하였으며 실험에 따라 L , t_p , κ_a 를 변경하면서 실험을 진행하였다.

[0123] 도 15는 실험에 사용된 속도 프로파일을 나타내고 있다. 실제적으로 커맨드의 임펄스의 크기는 같지만 시간의 차이만 나타난다. 실제 모터의 속도를 나타내기 때문에 이론적인 속도와 비교하여 약간의 오차가 있지만 이론적인 속도의 $\pm 2 \text{ cm/sec}^2$ 이내이다.

[0124] 도 16은 실험을 통해 얻은 Deflection Response를 나타내고 있다. 잔류변위가 약간 발생하는 이유는 이론적으로는 잔류변위가 0의 값을 가지지만, 실제 시스템에서의 경우는 외란이나 속도 프로파일의 이론적이 형태로 구동하기는 힘들기 때문이다. 과도 변위의 크기 변화는 거의 차이가 없으나 70%의 잔류변위의 저감의 성능 향상을 보이고 있음을 알 수 있다.

[0125] 도 17은 줄 길이 L 에 대한 Modeling error 에 대한 감도 곡선(sensitivity curve)이다. 실험변수 값은 $\kappa_a=0.5 \text{ m/s}^2$, $\kappa_d=1 \text{ m/s}^2$, $t_P=3.5 \text{ sec}$, $L=0.8 \text{ m}$, $V_d=0.2 \text{ m/s}$ 로 설정하였다. 기존의 EI 입력성형기의 경우 잔류변위의 크기가 제어되지 않고 있다. 하지만 본 발명의 가속도 제한 ALEI 입력성형기의 경우 잔류변위를 V_{lim} 값을 이용하여 제어하고 있다. 본 발명의 ALEI 입력성형기의 경우 기존의 입력성형기보다 강건함을 보이고 있다.

[0126]

도 18은 t_p 에 대한 잔류변위를 나타낸다. 실험변수 값은 $\kappa_a=0.5\text{m/s}^2$, $\kappa_d=1\text{m/s}^2$, $L=0.8\text{m}$, $V_d=0.2\text{m/s}$ 로 설정하였다. 기존의 입력성형기들은 EI 입력성형기의 경우 잔류변위의 크기가 제어되지 않고 있다. 하지만 본 발명의 가속도 제한 ALEI 입력성형기의 경우 잔류변위를 V_{lim} 값을 이용하여 제어하거나 0으로 만들고 있다. 여기서 본 발명의 ALEI 입력성형기의 경우 V_{lim} 만큼의 변위가 발생하기 때문에 기존의 입력성형기와 마찬가지로 주기적인 변위 특성을 보이지만 나타나는 변위 자체는 기존의 방법보다 낮은 변위를 보이고 있다.

[0127]

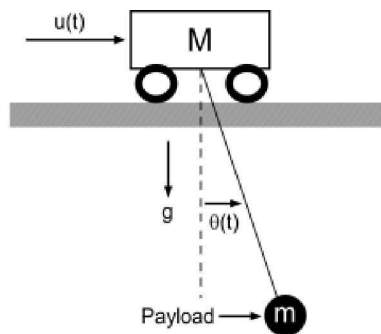
도 19는 가속도 제한의 중요 변수중 하나인 κ_a 에 대한 modeling error에 대하여 강건성을 나타낸 것이다. 실험변수 값은 $\kappa_a=0.5\text{m/s}^2$, $\kappa_d=1\text{m/s}^2$, $t_p=3.5\text{sec}$, $L=0.8\text{m}$, $V_d=0.2\text{m/s}$ 로 설정하였다. 기존의 EI 입력성형기의 경우 잔류 변위를 제어 하지 못하고 있으며, 본 발명의 ALEI 입력성형기의 경우 입력성형기의 특성상 κ_a/κ_{am} 이 1일 때 잔류변위가 나타나지만 기존의 입력성형기보다 낮은 변위를 나타낸다. 따라서 본 발명의 ALEI 입력성형기가 이상적인 입력성형기보다 κ_a 에 대해서 강건하다.

[0128]

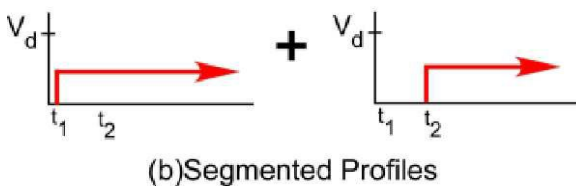
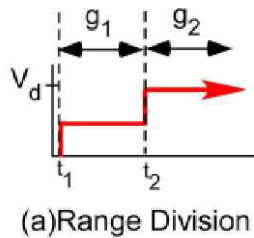
이상과 같이 본 발명에 따른 가속도 제한된 유연시스템에 대한 허용 잔류변위를 활용한 강건 입력성형 제어방법에 대해서 예시한 도면을 참조로 하여 설명하였으나, 본 명세서에 개시된 실시예와 도면에 의해 본 발명이 한정되는 것은 아니며, 본 발명의 기술사상의 범위 내에서 당업자에 의해 다양한 변형이 이루어질 수 있음은 물론이다.

도면

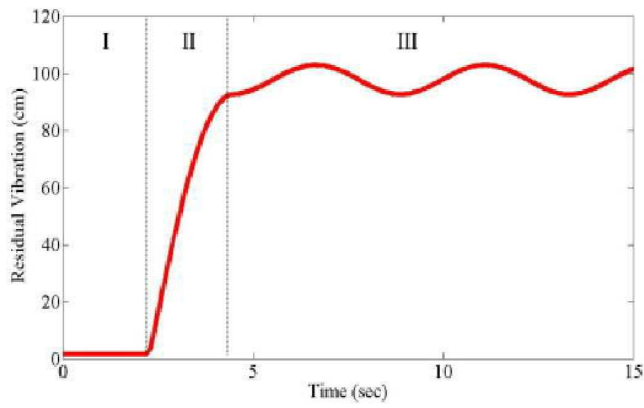
도면1



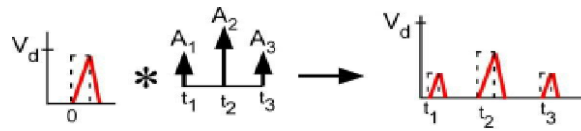
도면2



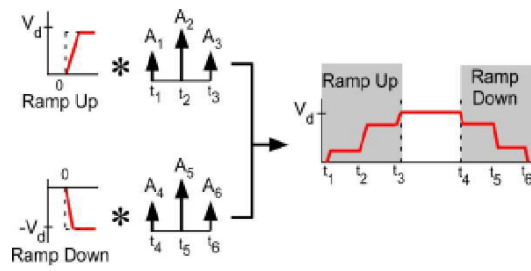
도면3



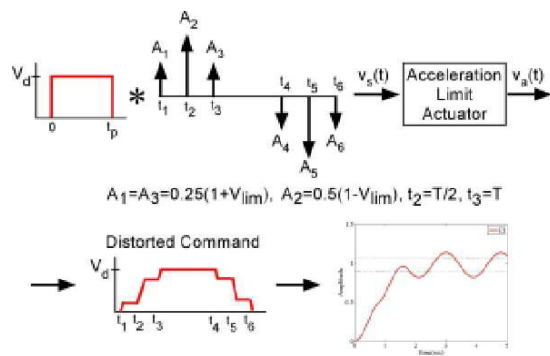
도면4



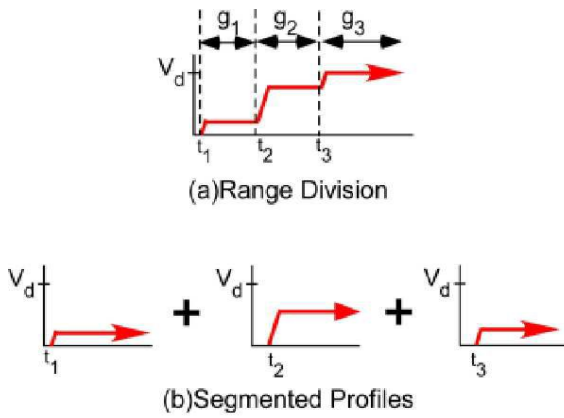
도면5



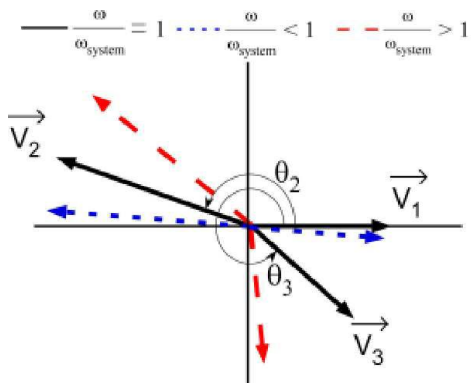
도면6



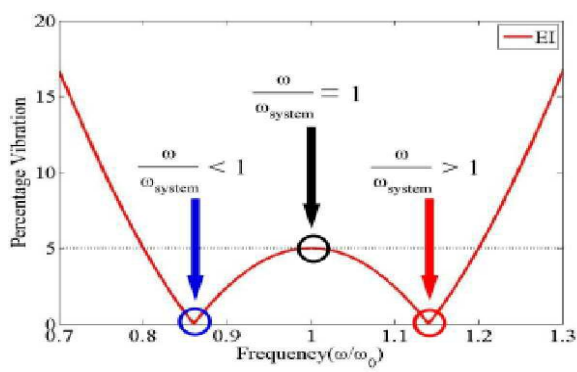
도면7



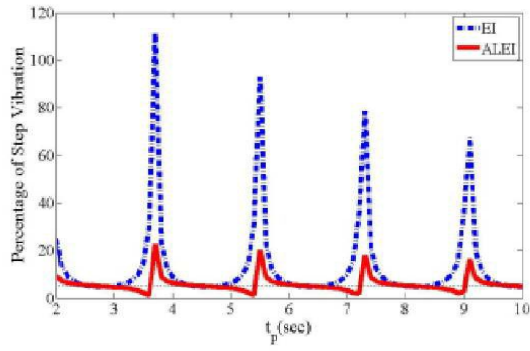
도면8



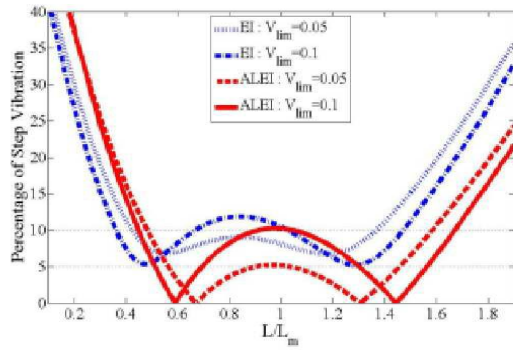
도면9



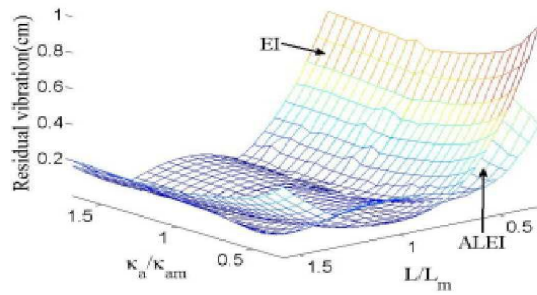
도면10



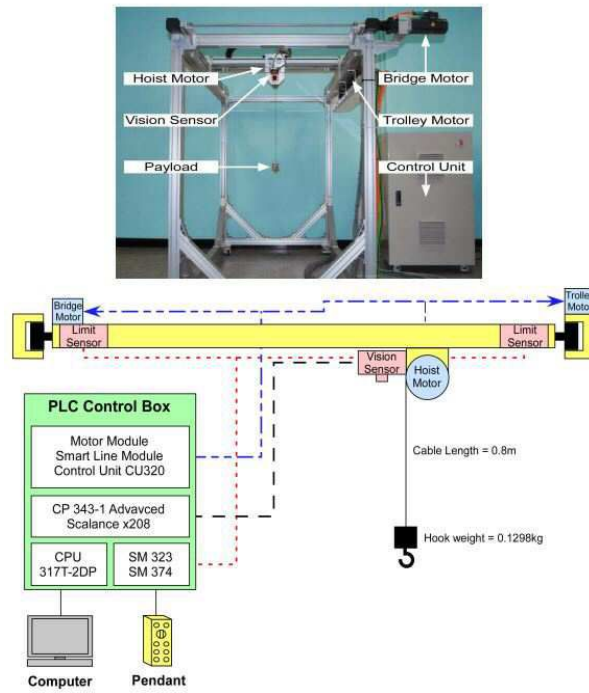
도면11



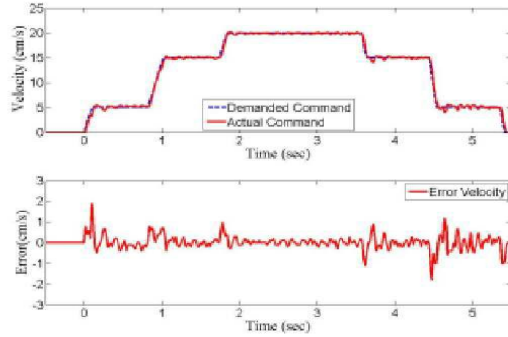
도면12



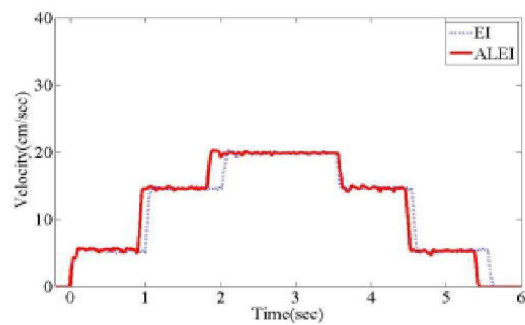
도면13



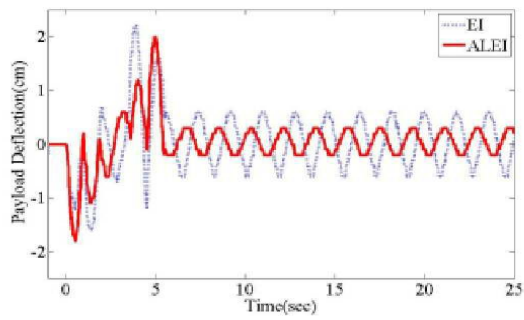
도면14



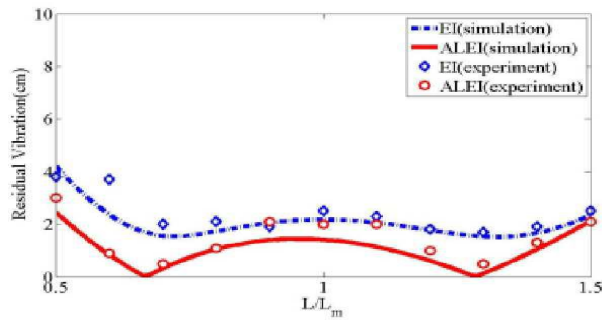
도면15



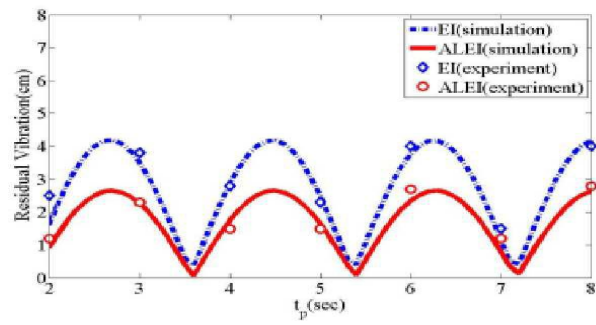
도면16



도면17



도면18



도면19

