



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2011-0132640
(43) 공개일자 2011년12월09일

(51) Int. Cl.

G05B 11/26 (2006.01) G05B 11/28 (2006.01)

(21) 출원번호 10-2010-0049193

(22) 출원일자 2010년05월26일

심사청구일자 2010년05월26일

(71) 출원인

조선대학교산학협력단

광주광역시 동구 서석동 375 조선대학교 내

(72) 발명자

성윤경

광주광역시 동구 서석동 375

김득현

광주광역시 동구 서석동 8-11

(74) 대리인

위병갑, 성정현

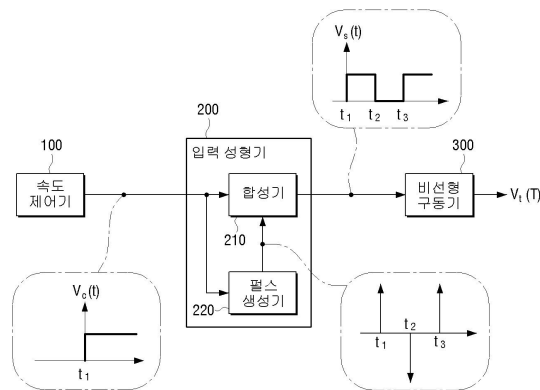
전체 청구항 수 : 총 9 항

(54) 비선형 구동기에 적용가능한 입력성형기 및 입력성형방법

(57) 요약

비선형 구동기에 적용가능한 입력성형기 및 입력성형방법이 제공된다. 본 입력성형기는, 비선형 구동기의 비선형 응답 특성을 기반으로 펄스들을 생성하는 펄스 생성부 및 입력되는 제어신호에 펄스 생성부에서 생성된 펄스들을 부가하여 비선형 구동기로 전달하는 합성부를 포함한다. 이에 의해, 비선형 구동기를 이용하는 시스템에 대해서도 시스템의 잔류진동을 효과적으로 저감시킬 수 있게 된다.

대표도 - 도2



이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호

부처명 중소기업청

연구관리전문기관

연구사업명 산학연공동기술개발

연구과제명 크레인 시스템의 고부가가치를 위한 원격입력성형제어장치

기여율

주관기관 조선대학교 산학협력단

연구기간 2009년 6월 1일~2010년 3월 31일

특허청구의 범위

청구항 1

비선형 구동기의 비선형 응답 특성을 기반으로 펄스들을 생성하는 펄스 생성부; 및
입력되는 제어신호에 상기 펄스 생성부에서 생성된 펄스들을 부가하여 상기 비선형 구동기로 전달하는 합성부;
를 포함하는 것을 특징으로 하는 입력성형기.

청구항 2

제 1항에 있어서,
상기 펄스 생성부는,
상기 비선형 구동기의 비선형 응답 특성을 기초로 결정된 시점들에 펄스들을 생성하는 것을 특징으로 하는 입력성형기.

청구항 3

제 1항에 있어서,
상기 펄스들이 생성되는 시점들은,
상기 시점들을 경계들로 구분한 시구간들에서 상기 비선형 구동기의 응답특성들의 벡터합이 최소가 되도록 하는 시점들인 것을 특징으로 하는 입력성형기.

청구항 4

제 1항에 있어서,
상기 펄스 생성부는,
출발 동작의 경우, + 펄스, - 펄스 및 + 펄스를 순차적으로 생성하고,
정지 동작의 경우, - 펄스, + 펄스 및 - 펄스를 순차적으로 생성하는 것을 특징으로 하는 입력성형기.

청구항 5

제 1항에 있어서,
상기 정지 동작에서 생성하는 펄스들의 생성 시점들은,
상기 출발 동작에서 생성하는 펄스들의 생성 시점들과 동일한 방법으로 결정되는 것을 특징으로 하는 입력성형기.

청구항 6

비선형 구동기의 비선형 응답 특성을 기반으로 펄스들을 생성하는 단계; 및
입력되는 제어신호에 상기 펄스 생성단계에서 생성된 펄스들을 부가하여 상기 비선형 구동기로 전달하는 단계;
를 포함하는 것을 특징으로 하는 입력성형방법.

청구항 7

제 6항에 있어서,
상기 펄스 생성단계는,
상기 비선형 구동기의 비선형 응답 특성을 기초로 결정된 시점들에 펄스들을 생성하는 것을 특징으로 하는 입력성형방법.

청구항 8

제 6항에 있어서,

상기 펄스들이 생성되는 시점들은,

상기 시점들을 경계들로 구분한 시구간들에서 상기 비선형 구동기의 응답특성들의 벡터합이 최소가 되도록 하는 시점들인 것을 특징으로 하는 입력성형방법.

청구항 9

시스템을 제어하기 위한 제어신호를 생성하는 제어기;

입력되는 제어신호를 이용하여 시스템을 비선형적으로 구동하는 비선형 구동기; 및

상기 비선형 구동기의 비선형 응답 특성을 기반으로 생성한 펄스들을 상기 제어기에서 생성된 제어신호에 부가하여 상기 비선형 구동기로 전달하는 입력 성형기;를 포함하는 것을 특징으로 하는 비선형 제어 시스템.

명 세 서

기술 분야

[0001] 본 발명은 입력성형기 및 입력성형방법에 관한 것으로, 더욱 상세하게는 비선형 구동기에 적용가능한 입력성형기 및 입력성형방법에 관한 것이다.

배 경 기 술

[0002] 유연시스템을 갖는 구조물이 기동할 때 과도 및 잔류 진동이 발생된다. 진동현상은 산업현장의 안전성 및 작업시간의 증가로 생산성 저하를 야기한다. 따라서, 유연시스템의 기동에 따른 진동현상을 저감하기 위해 많은 연구가 진행되어 왔다.

[0003] 특히, 피드백 제어가 필요하지 않은 입력성형(Input Shaping) 기술이 유연시스템의 과도 및 잔류 진동 변위의 저감을 위해 활용될 수 있다. 도 1은 입력성형 기술의 기본 이론으로 두 개의 같은 크기 펄스에 의해, T/2시간 이후 잔류진동이 사라졌음을 나타내고 있다.

[0004] 또한, 입력성형 기술을 응용하여, 유연시스템의 변위를 저감시키기 위한 robustness의 개선, 과도변위의 제한 및 에너지 소비량 저감 등의 많은 연구가 있었다. 하지만, 입력성형 기술은 선형 시스템에 기반한 기술이므로, 선형 유연시스템의 잔류진동을 저감하는데 이용됨이 일반적이다.

[0005] 기존의 입력성형 기술을 비선형적 특성을 보이는 구동기에 적용하게 되면, 시스템의 진동저감 성능이 낮게 나타나는 문제가 있다.

발명의 내용

해결하려는 과제

[0006] 본 발명은 상기와 같은 문제점을 해결하기 위하여 안출된 것으로서, 본 발명의 목적은, 비선형 구동기의 비선형 응답 특성을 기반으로 입력성형을 수행하는 입력성형기 및 입력성형방법을 제공함에 있다.

과제의 해결 수단

[0007] 상기 목적을 달성하기 위한 본 발명에 따른, 입력성형기는, 비선형 구동기의 비선형 응답 특성을 기반으로 펄스들을 생성하는 펄스 생성부; 및 입력되는 제어신호에 상기 펄스 생성부에서 생성된 펄스들을 부가하여 상기 비선형 구동기로 전달하는 합성부;를 포함한다.

[0008] 그리고, 상기 펄스 생성부는, 상기 비선형 구동기의 비선형 응답 특성을 기초로 결정된 시점들에 펄스들을 생성하는 것이 바람직하다.

[0009] 또한, 상기 펄스들이 생성되는 시점들은, 상기 시점들을 경계들로 구분한 시구간들에서 상기 비선형 구동기의 응답특성들의 벡터합이 최소가 되도록 하는 시점들인 것이 바람직하다.

[0010] 그리고, 상기 펄스 생성부는, 출발 동작의 경우, + 펄스, - 펄스 및 + 펄스를 순차적으로 생성하고, 정지 동작의 경우, - 펄스, + 펄스 및 - 펄스를 순차적으로 생성할 수 있다.

- [0011] 또한, 상기 정지 동작에서 생성하는 펄스들의 생성 시점들은, 상기 출발 동작에서 생성하는 펄스들의 생성 시점들과 동일한 방법으로 결정될 수 있다.
- [0012] 한편, 본 발명에 따른, 입력성형방법은, 비선형 구동기의 비선형 응답 특성을 기반으로 펄스들을 생성하는 단계; 및 입력되는 제어신호에 상기 펄스 생성단계에서 생성된 펄스들을 부가하여 상기 비선형 구동기로 전달하는 단계;를 포함한다.
- [0013] 그리고, 상기 펄스 생성단계는, 상기 비선형 구동기의 비선형 응답 특성을 기초로 결정된 시점들에 펄스들을 생성할 수 있다.
- [0014] 또한, 상기 펄스들이 생성되는 시점들은, 상기 시점들을 경계들로 구분한 시구간들에서 상기 비선형 구동기의 응답특성들의 백터합이 최소가 되도록 하는 시점들일 수 있다.
- [0015] 한편, 본 발명에 따른, 비선형 제어 시스템은, 시스템을 제어하기 위한 제어신호를 생성하는 제어기; 입력되는 제어신호를 이용하여 시스템을 비선형적으로 구동하는 비선형 구동기; 및 상기 비선형 구동기의 비선형 응답 특성을 기반으로 생성한 펄스들을 상기 제어기에서 생성된 제어신호에 부가하여 상기 비선형 구동기로 전달하는 입력 성형기;를 포함한다.

발명의 효과

- [0016] 이상 설명한 바와 같이, 본 발명에 따르면, 비선형 구동기의 비선형 응답 특성을 기반으로 입력성형을 수행할 수 있게 되어, 비선형 구동기를 이용하는 시스템에 대해서도 시스템의 잔류진동을 효과적으로 저감시킬 수 있게 된다.

도면의 간단한 설명

- [0017] 도 1은 입력성형 기술의 기본 이론을 나타낸 도면,
 도 2는 본 발명이 적용가능한 비선형 속도제어 시스템의 블록도,
 도 3은, 도 2에 도시된 비선형 구동기에서 출력되는 구동신호를 도시한 도면,
 도 4는, 3에 따른 $G(S)$ 의 시간응답 특성을 도시한 그래프,
 도 5는, 유연시스템에서 잔류진동을 최소화시키기 위한, $V1$, $V2$ 및 $V3$ 의 백터도,
 도 6은, 유연 시스템의 정지 동작 속도 제어 과정의 설명에 제공되는 도면,
 도 7은, 도 2와 도 6에 도시된 입력 성형기가 속도 제어기로부터 인가되는 속도 제어신호를 성형하는 과정의 설명에 제공되는 도면,
 도 8은, ω_n 의 변화에 따른 펄스 발생 시점들을 나타낸 그래프,
 도 9 내지 도 11은, 위 실시예에서 제시한 비선형 속도제어 시스템의 잔류진동과 기존의 선형 속도제어 시스템에서의 잔류진동을 컴퓨터 시뮬레이션한 결과를 나타낸 도면,
 도 12는 위 실시예에서 제시한 비선형 속도제어 시스템을 실제 제작한 결과를 촬영한 사진,
 도 13은 모델링 에러에 대한 NUMZV의 민감도를 나타낸 그래프, 그리고,
 도 14는 tp 변화에 따른 잔류진동 측정 결과를 나타낸 그래프이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

- [0018] 이하에서는 도면을 참조하여 본 발명을 보다 상세하게 설명한다.
- [0019] 도 2는 본 발명이 적용가능한 비선형 속도제어 시스템의 블록도이다. 도 2에 도시된 비선형 속도제어 시스템은 진동없는 유연한 동작이 요구되는 유연시스템(Flexible System)의 구동속도를 제어하는 시스템이다.
- [0020] 도 2에 도시된 바와 같이, 비선형 속도제어 시스템은, 속도 제어기(100), 입력 성형기(Input Shaper)(200) 및 비선형 구동기(Nonlinear Actuator)(300)를 구비한다.
- [0021] 속도 제어기(100)는 유연시스템의 구동속도를 제어하기 위한 속도 제어신호(V_c)를 생성하고, 생성된 속도 제어

신호를 입력 성형기(200)로 인가한다.

- [0022] 입력 성형기(200)는 속도 제어기(100)로부터 인가되는 속도 제어신호를 성형하고, 성형된 속도 제어신호(V_s)를 비선형 구동기(300)에 인가한다. 구체적으로, 입력 성형기(200)는 펄스들을 생성하고, 생성된 펄스들을 속도 제어신호를 추가하는 방식으로, 속도 제어신호를 성형한다.
- [0023] 비선형 구동기(300)는 입력 성형기(200)로부터 인가되는 성형된 속도 제어신호를 이용하여 유연시스템을 구동하기 위한 구동신호(V_t)를 생성하고, 생성된 구동신호를 유연시스템으로 인가한다.
- [0024] 도 2에 도시된 바와 같이, 입력 성형기(200)는 합성기(210) 및 펄스 생성기(220)를 구비한다.
- [0025] 합성기(210)는 속도 제어기(100)로부터 인가되는 속도 제어신호에 펄스 생성부(220)가 생성한 펄스들을 추가하여 비선형 구동기(300)로 전달한다.
- [0026] 펄스 생성기(220)는 속도 제어기(100)로부터 인가되는 속도 제어신호를 성형하기 위한 펄스들을 생성한다. 펄스 생성기(220)에 의한 펄스 생성은, 비선형 구동기(300)의 비선형 응답 특성에 기반한다.
- [0027] 구체적으로, 펄스 생성기(220)는, 비선형 구동기(300)의 비선형 응답 특성을 기초로 결정된 펄스 발생 시점들에 펄스들을 발생시킨다. 이하에서는, 비선형 구동기(300)의 비선형 응답 특성을 기초로 펄스 발생 시점들이 결정되는 과정에 대해 상세히 설명한다.
- [0028] 1) 속도 제어기(100)에서 도 2에 도시된 바와 같은 속도 제어신호[$V_c(t)$]를 생성하고, 2) 펄스 생성기(220)는 도 2에 도시된 바와 같은 펄스들을 t_1 , t_2 및 t_3 에 생성하여, 3) 합성기(210)에서 도 2에 도시된 바와 같은 성형된 속도 제어신호[$V_s(t)$]를 생성한 경우에, 비선형 구동기(300)에서 출력되는 구동신호[$V_t(t)$]를 도 3에 도시하였다.
- [0029] 도 3에 도시된 바에 따르면, 비선형 구동기(300)에서 출력되는 구동신호[$V_t(t)$]는 overshoot, time delay, oscillation 등의 비선형적 특성을 보이고 있음을 확인할 수 있다.
- [0030] 도 3과 같은 비선형적 특성을 나타내는 비선형 구동기(300)의 응답함수를 2nd-order로 근사화하면 아래의 수학식 1과 같이 표현가능하다.

수학식 1

[0031]
$$G(s) = \frac{\omega}{s^2 + 2\zeta\omega s + \omega^2}$$

- [0032] 위 $G(s)$ 에 대한 시간응답 특성은 ζ 에 따라 달라지며, 도 4에는 ζ 에 따른 $G(s)$ 의 시간응답 특성을 도시하였다. 도 4에 도시된 결과를 식으로 나타내면, 아래의 수학식 2와 같이 표현된다.

수학식 2

[0033] 1) $\zeta > 1$

[0034]
$$y(t) = 1 - e^{-\omega t} \cosh(\omega \sqrt{\zeta^2 - 1} t) - \frac{\zeta}{\sqrt{\zeta^2 - 1}} e^{-\omega t} \sinh(\omega \sqrt{\zeta^2 - 1} t)$$

[0035] 2) $\zeta = 1$

[0036]
$$y(t) = 1 - e^{-\omega t} - \omega t e^{-\omega t}$$

[0037] 3) $0 < \zeta < 1$

$$y(t)=1-\frac{\zeta e^{\zeta \omega t}}{\sqrt{1-\zeta^2}} \sin \omega t-e^{-\zeta \omega t} \cos \omega t$$

[0038]

[0039] 한편, 비선형 구동기(300)에서 출력되는 구동신호(Vt)를 도 3에 도시된 바와 같이 "t1(=0) ~ t2", "t2 ~ t3" 및 "t3 ~ "의 세 구간으로 나누고, 수학식 2를 이용하여 각각을 g1(t), g3(t) 및 g3(t)으로 나타내면 아래의 수학식 3과 같다.

수학식 3

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

[0040]

$$g_1(t)=v_{\max } \cdot\left(1-\frac{e^{-\xi_1 w_1 t}}{\sqrt{1-\xi_1^2}} \sin \left(w_1 \sqrt{1-\xi_1^2}+\tan ^{-1} \frac{\sqrt{1-\xi_1^2}}{\xi_1}\right)\right)$$

[0041]

$$g_2(t)=-v_{\max } \cdot\left(1-\frac{e^{-\xi_2 w_2 t}}{\sqrt{1-\xi_2^2}} \sin \left(w_2 \sqrt{1-\xi_2^2}+\tan ^{-1} \frac{\sqrt{1-\xi_2^2}}{\xi_2}\right)\right)$$

[0042]

$$g_3(t)=v_{\max } \cdot\left(1-\frac{e^{-\xi_1 w_1 t}}{\sqrt{1-\xi_1^2}} \sin \left(w_1 \sqrt{1-\xi_1^2}+\tan ^{-1} \frac{\sqrt{1-\xi_1^2}}{\xi_1}\right)\right)$$

[0043]

[0044] 그리고, 수학식 3에 나타난 g1(t), g3(t) 및 g3(t)를 라플라스 변환한 결과는 아래의 수학식 4와 같다.

수학식 4

$$g_1(s)=v_{\max } \cdot \frac{w_1^2}{s\left(s^2+2 \xi_1 w_1 s+w_1^2\right)}$$

[0045]

$$g_2(s)=-v_{\max } \cdot \frac{w_2^2}{s\left(s^2+2 \xi_2 w_2 s+w_2^2\right)}$$

[0046]

$$g_3(s)=v_{\max } \cdot \frac{w_1^2}{s\left(s^2+2 \xi_1 w_1 s+w_1^2\right)}$$

[0047]

[0048] 또한, 수학식 4에 나타난 g1(s), g3(s) 및 g3(s)를 아래의 수학식 5에 나타난 바와 같은 페이지 형식으로 표기하면, 수학식 6의 V1, V2 및 V3와 같다.

수학식 5

$$\overrightarrow{v} = \frac{|v_t(jw_n)|}{L} \angle \left(-\frac{\Pi}{2} + \angle v_t(jw_n) \right)$$

$$|v_t(jw_n)| = \sqrt{\left(\frac{w^2(-2\xi w w_n^2)}{w_n^2(4\xi^2 w^2 w_n^2 + w^4 - 2w^2 w_n^2 + w_n^4)} \right)^2 + \left(\frac{-w^2(w^2 w_n - w_n^3)j}{w_n^2(4\xi^2 w^2 w_n^2 + w^4 - 2w^2 w_n^2 + w_n^4)} \right)^2}$$

$$\angle v_t(jw_n) = \tan^{-1} \frac{\text{허수부}}{\text{실수부}}$$

수학식 6

$$\overrightarrow{v_1} = \frac{v_{\max} \cdot w_1 \sqrt{4\xi_1^2 w_1^4 w_n^2 + w_1^6 - 2w_1^4 w_n^2 + w_n^6 w_1^4}}{L \cdot w_n (4\xi_1^2 w_1^2 w_n^2 + w_1^4 - 2w_1^2 w_n^2 + w_n^4)} \angle \left[\tan^{-1} \left(\frac{-(w_1^2 - w_n^2)}{-2\xi_1 w_1 w_n} \right) - \frac{3\pi}{2} \right]$$

$$\overrightarrow{v_2} = \frac{-v_{\max} \cdot w_2 \sqrt{4\xi_2^2 w_2^4 w_n^2 + w_2^6 - 2w_2^4 w_n^2 + w_n^6 w_2^4}}{L \cdot w_n (4\xi_2^2 w_2^2 w_n^2 + w_2^4 - 2w_2^2 w_n^2 + w_n^4)} \angle \left[\tan^{-1} \left(\frac{(w_2^2 - w_n^2)}{-2\xi_2 w_2 w_n} \right) - \frac{\pi}{2} \right]$$

$$\overrightarrow{v_3} = \frac{v_{\max} \cdot w_1 \sqrt{4\xi_1^2 w_1^4 w_n^2 + w_1^6 - 2w_1^4 w_n^2 + w_n^6 w_1^4}}{L \cdot w_n (4\xi_1^2 w_1^2 w_n^2 + w_1^4 - 2w_1^2 w_n^2 + w_n^4)} \angle \left[\tan^{-1} \left(\frac{-(w_1^2 - w_n^2)}{-2\xi_1 w_1 w_n} \right) - \frac{3\pi}{2} \right]$$

한편, 수학식 6을 간단하게 나타내기 위해, 1) V1의 벡터크기로, V1, V2 및 V3을 각각 나누고, 2) V1의 벡터각을 V1, V2 및 V3에서 빼면, V1, V2 및 V3은 아래의 수학식 7과 같이 간소화된다.

수학식 7

$$\overrightarrow{v_1} = 1 \angle [w_n t_1]$$

$$\overrightarrow{v_2} = \frac{\frac{v_{\max} \cdot w_2 \sqrt{4\xi_2^2 w_2^4 w_n^2 + w_2^6 - 2w_2^4 w_n^2 + w_n^6 w_2^4}}{L \cdot w_n (4\xi_2^2 w_2^2 w_n^2 + w_2^4 - 2w_2^2 w_n^2 + w_n^4)}}{\frac{v_{\max} \cdot w_1 \sqrt{4\xi_1^2 w_1^4 w_n^2 + w_1^6 - 2w_1^4 w_n^2 + w_n^6 w_1^4}}{L \cdot w_n (4\xi_1^2 w_1^2 w_n^2 + w_1^4 - 2w_1^2 w_n^2 + w_n^4)}}$$

$$\angle \left[\tan^{-1} \frac{w_2^2 - w_n^2}{2\xi_2 w_2 w_n} - \tan^{-1} \frac{w_1^2 - w_n^2}{2\xi_1 w_1 w_n} - \frac{\pi}{2} + \frac{3\pi}{2} \right]$$

$$\overrightarrow{v_3} = 1 \angle [w_n t_3]$$

위 수학식 7에서 t1, t2 및 t3은, 펄스 생성기(220)가 펄스들을 생성하는 시점들이다. 구체적으로, 펄스 생성기(220)는, t1에서 + 펄스를 생성하고, t2에서 - 펄스를 생성하고, t3에서 + 펄스를 생성한다.

이하에서, t1, t2 및 t3이 결정되는 과정에 대해 상세히 설명한다. 유연시스템에서 잔류진동을 최소화시키기 위해, 도 5에 도시된 바와 같이, V1, V2 및 V3의 벡터 합을 "0" 벡터로 설정한다. 여기서, V1, V2 및 V3의 벡터 합을 "0" 벡터로 설정한다 함은, V1, V2 및 V3의 벡터 합을 최소로 설정함을 의미한다.

[0062] 도 5에서 V2의 벡터각은 a2이고, V3의 벡터각은 a3임을 확인할 수 있다.

[0063] 도 5에 도시된 설정에 따르면, 아래의 수학식 8이 성립하며, 이 수학식 8에 의해 아래의 수학식 9가 유도된다.

수학식 8

$$(\vec{v}_3)^2 = (\vec{v}_1)^2 + (\vec{v}_2)^2 - 2^* (\vec{v}_1)^2^* (\vec{v}_2)^2 \cos(a_2)$$

$$\vec{v}_3 = \vec{v}_1 = 1$$

수학식 9

$$\cos(w_n t_2 + \tan^{-1} \frac{w_2^2 - w_n^2}{2\xi_2 w_2 w_n} - \tan^{-1} \frac{w_1^2 - w_n^2}{2\xi_1 w_1 w_n} + \pi) = \frac{\beta}{2}$$

$$\cos(\pi - w_n t_3) = \frac{\beta^2}{2} - 1$$

$$\beta = \frac{\frac{w_2 \sqrt{4\xi_2^2 w_2^4 w_n^2 + w_2^6 - 2w_2^4 w_n^2 + w_n^4 w_2^2}}{(4\xi_2^2 w_2^2 w_n^2 + w_2^4 - 2w_2^2 w_n^2 + w_n^4)}}{\frac{w_1 \sqrt{4\xi_1^2 w_1^4 w_n^2 + w_1^6 - 2w_1^4 w_n^2 + w_n^4 w_1^2}}{(4\xi_1^2 w_1^2 w_n^2 + w_1^4 - 2w_1^2 w_n^2 + w_n^4)}}$$

그리고, 수학식 9에 제시된 식들을 각각 t2 및 t3에 대해 정리하면, 아래의 수학식 10이 유도되며, 이 수학식 10을 통해 t2 및 t3이 결정된다. 또한, t1은 유연 시스템 출발 동작(start motion) 시작 시점으로, Vc(t)의 레벨 변화를 통해 인지할 수 있는데, 편의상 0으로 설정한다.

수학식 10

$$t1 = 0$$

$$t_2 = \frac{1}{w_n} (\tan^{-1} \frac{w_2^2 - w_n^2}{2\xi_2 w_2 w_n} - \tan^{-1} \frac{w_1^2 - w_n^2}{2\xi_1 w_1 w_n} + \cos^{-1}(\frac{\beta}{2}))$$

$$t_3 = \frac{1}{w_n} (\cos^{-1}(\frac{\beta^2}{2} - 1))$$

지금까지, 설명한 것은 유연 시스템의 출발 동작 속도 제어시, 펄스 생성기(220)에 의한 펄스 생성 시점들이다. 유연 시스템의 정지 동작(stop motion) 속도 제어 과정은, 도 6에 도시되어 있다.

유연 시스템의 정지 동작 시, 1) 속도 제어기(100)는 도 6에 도시된 바와 같은 속도 제어신호[Vc(t)]를 생성하고, 2) 펄스 생성기(220)는 도 6에 도시된 바와 같은 펄스들을 t4, t5 및 t6에 생성하여, 3) 합성기(210)에서는 도 6에 도시된 바와 같은 성형된 속도 제어신호[Vs(t)]가 생성된다.

펄스 생성기(220)에 의해 첫 번째 펄스가 생성되는 시점인 t4는 유연 시스템의 정지 동작 시작 시점으로, Vc(t)의 레벨 변화를 통해 인지할 수 있다. 그리고, 펄스 생성기(220)에 의해 두 번째 펄스와 세 번째 펄스가 생

성되는 시점인 t_5 및 t_6 은 출발 동작시 결정된 t_2 및 t_3 과 동일한 방식으로 결정될 수 있다.

정지 동작의 시작 시점인 t_4 를 " t_p "로 설정할 경우, t_5 와 t_6 는 아래의 수학적 식 11에 따라 결정된다.

수학적 식 11

$$t_4 = t_p$$

$$t_5 = t_p + \frac{1}{w_n} \left(\tan^{-1} \frac{\omega_1^2 - w_n^2}{2\zeta_1 \omega_1 w_n} - \tan^{-1} \frac{\omega_2^2 - w_n^2}{2\zeta_2 \omega_2 w_n} + \cos^{-1} \left(\frac{\beta_2}{2} \right) \right)$$

$$t_6 = t_p + \frac{1}{w_n} \left(\cos^{-1} \left(\frac{\beta_2^2}{2} - 1 \right) \right)$$

$$\beta_2 = \frac{\frac{\omega_1 \sqrt{4\zeta_1^2 \omega_1^4 w_n^2 + \omega_1^6 - 2\omega_1^4 w_n^2 + w_n^4 \omega_1^2}}{(4\zeta_1^2 \omega_1^2 w_n^2 + \omega_1^4 - 2\omega_1^2 w_n^2 + w_n^4)}}{\frac{\omega_2 \sqrt{4\zeta_2^2 \omega_2^4 w_n^2 + \omega_2^6 - 2\omega_2^4 w_n^2 + w_n^4 \omega_2^2}}{(4\zeta_2^2 \omega_2^2 w_n^2 + \omega_2^4 - 2\omega_2^2 w_n^2 + w_n^4)}}$$

지금까지, 유연 시스템의 출발 동작 속도 제어시 펄스 생성기(220)에 의한 펄스 생성 시점들(t_1 , t_2 및 t_3)을 결정하고, 유연 시스템의 정지 동작 속도 제어시 펄스 생성기(220)에 의한 펄스 생성 시점들(t_4 , t_5 및 t_6)을 결정하는 과정에 대해 상세히 설명하였다.

이하에서는, 도 2와 도 6에 도시된 입력 성형기(200)가 속도 제어기(100)로부터 인가되는 속도 제어신호를 성형하는 과정에 대해, 도 7을 참조하여 상세히 설명한다.

도 7에 도시된 바와 같이, 속도 제어기(100)로부터 속도 제어신호(V_c)가 입력되면(S410-Y), 펄스 생성기(220)는 비선형 구동기(300)의 비선형 응답 특성을 기초로 결정된 시점들에 펄스들을 생성한다(S420).

그러면, 합성기(210)는 속도 제어기(100)로부터 인가되는 속도 제어신호에 S420단계에서 생성된 펄스들을 부가한다(S430).

그리고, 합성기(210)는 S430단계에서 펄스들이 부가된 속도 제어신호를 비선형 구동기(300)로 전달한다(S440).

도 8에는 ω_n 의 변화에 따른 펄스 발생 시점들을 나타내었다. 도 8에 도시된 바에 따르면, t_1 과 t_p 는 ω_n 의 변화와 무관한 특성을 가지는데 t_1 과 t_p 는 ω_n 가 아닌 속도 제어기(100)에서 생성된 속도 제어신호(V_c)에 의해 결정되기 때문이다.

또한, t_5 및 t_6 은 t_2 및 t_3 과 동일한 형상임을 확인할 수 있으며, t_2 , t_3 , t_5 및 t_6 모두 ω_n 이 증가함에 따라 감소하는 경향을 보인다. 즉, ω_n 이 증가함에 따라 펄스 발생 시점들의 간격은 좁아진다고 할 수 있다.

위 실시예에서 제시한 비선형 속도제어 시스템의 잔류진동(Residual Vibration)과 기존의 선형 속도제어 시스템에서의 잔류진동을 컴퓨터 시뮬레이션한 결과를, 도 9 내지 도 11에 나타내었다.

구체적으로, 도 9는 ω_1 의 변화에 따른 잔류진동 측정 결과를 나타낸 그래프이고, 도 10은 ζ_1 의 변화에 따른 잔류진동 측정 결과를 나타낸 그래프이며, 도 11은 ζ_1 와 ω_1 의 변화에 따른 잔류진동 측정 결과를 나타낸 그래프이다.

도 9 내지 도 11에서, "NUMZV(Nonlinear Unit Magnitude Zero Vibration)"로 표기된 그래프는 위 실시예에서 제시한 비선형 속도제어 시스템에서의 잔류진동에 해당하고, "UMZV(Unit Magnitude Zero Vibration)"로 표기된

그래프는 기존의 선형 속도제어 시스템에서의 잔류진동에 해당한다.

[0090] 도 9 내지 도 11에 도시된 NUMZV의 잔류진동과 UMZV의 잔류진동을 비교하면, NUMZV의 잔류진동이 UMZV의 잔류진동 보다 훨씬 더 작음을 확인할 수 있다.

[0091] 도 12는 위 실시예에서 제시한 비선형 속도제어 시스템을 실제 제작한 결과를 촬영한 사진이다. 도 12에 실제 제작된 비선형 속도제어 시스템의 사양은 아래의 표 1과 같다.

표 1

function parameter				model parameters		
ω_1	ω_2	ζ_1	ζ_2	L(meter)	t_p (sec)	V_s (mm/sec)
0.8	1.2	20	50	0.8	2.5	300

[0092]

[0093] 도 13은 모델링 에러에 대한 NUMZV의 민감도를 나타내는데, 이는 제어 시스템의 성능 비교에 많은 영향을 끼치는 요인이다. 도 13에 도시된 바에 따르면, 비선형 구동기의 동적 특성을 고려 하지 않은 UMZV는 이를 고려한 NUMZV 보다, 모델링 에러에 대한 잔류진동의 성능이 전체적으로 20% 이상 작음을 확인할 수 있다.

[0094] 또한, 도 14는 t_p 변화에 따른 잔류진동 측정 결과를 나타낸 그래프이다. 도 14에 도시된 바에 따르면 NUMZV는 t_p 에 대해 0.5cm이하의 잔류진동 크기를 보이고 있으나, UMZV는 최대 2cm의 잔류진동크기를 보이고 있어, UMZV 보다 비선형 구동기 동적 특성을 고려한 NUMZV가 75% 개선된 제어성능을 나타내고 있음을 확인할 수 있다.

[0095] 한편, 위 실시예에서는 속도 제어 시스템을 언급하였으나, 이는 설명의 편의를 위한 일 예에 불과하다. 속도가 아닌 다른 파라미터를 제어하는 시스템에도 본 발명의 기술적 사상이 적용될 수 있다.

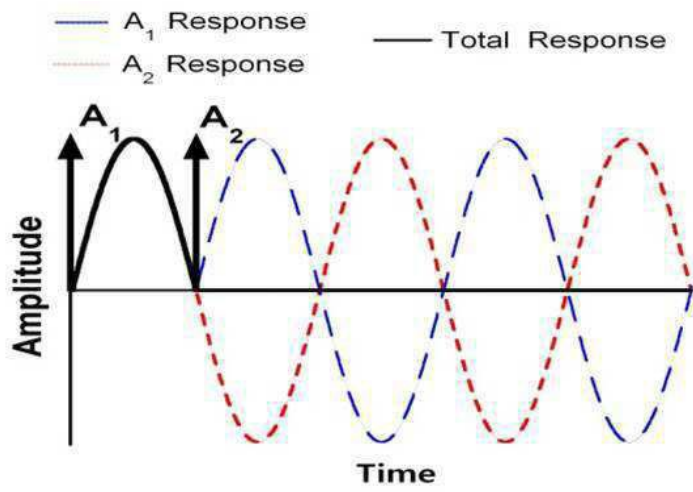
[0096] 또한, 이상에서는 본 발명의 바람직한 실시예에 대하여 도시하고 설명하였지만, 본 발명은 상술한 특성의 실시예에 한정되지 아니하며, 청구범위에서 청구하는 본 발명의 요지를 벗어남이 없이 당해 발명이 속하는 기술분야에서 통상의 지식을 가진자에 의해 다양한 변형실시가 가능한 것은 물론이고, 이러한 변형실시들은 본 발명의 기술적 사상이나 전망으로부터 개별적으로 이해되어져서는 안될 것이다.

부호의 설명

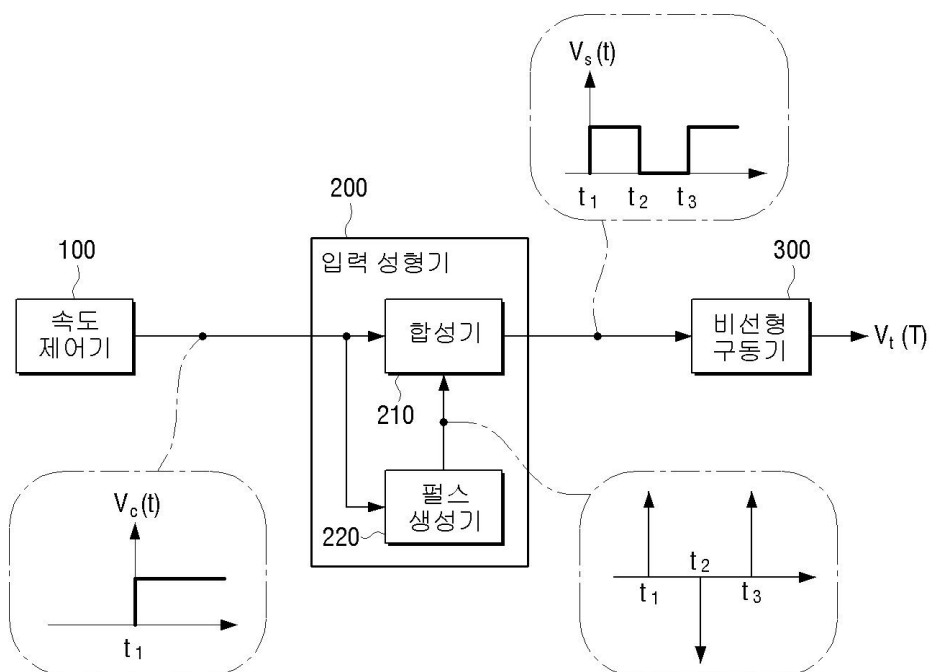
[0097] 100 : 속도 제어기
200 : 입력 성형기
210 : 합성기
220 : 펄스 생성기
300 : 비선형 구동기

도면

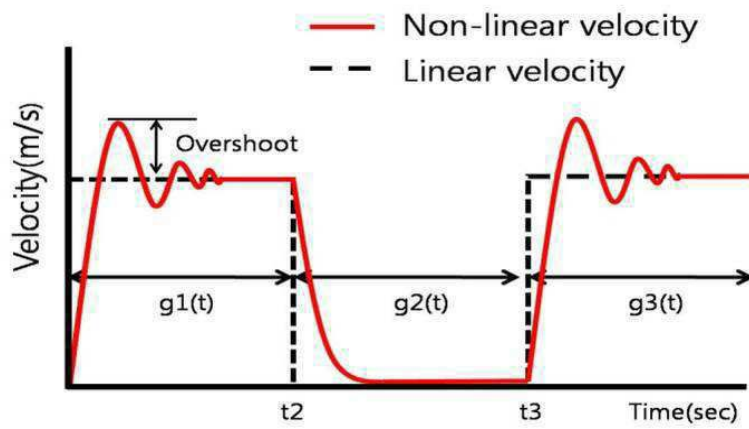
도면1



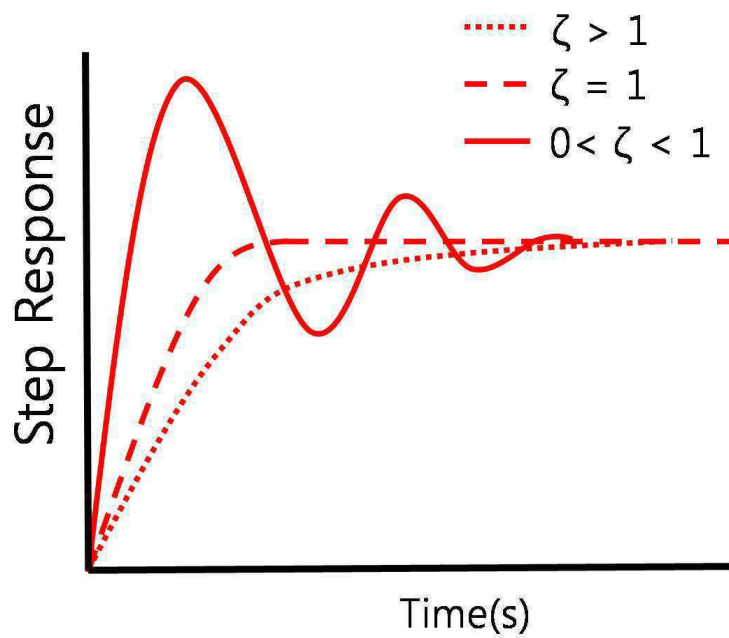
도면2



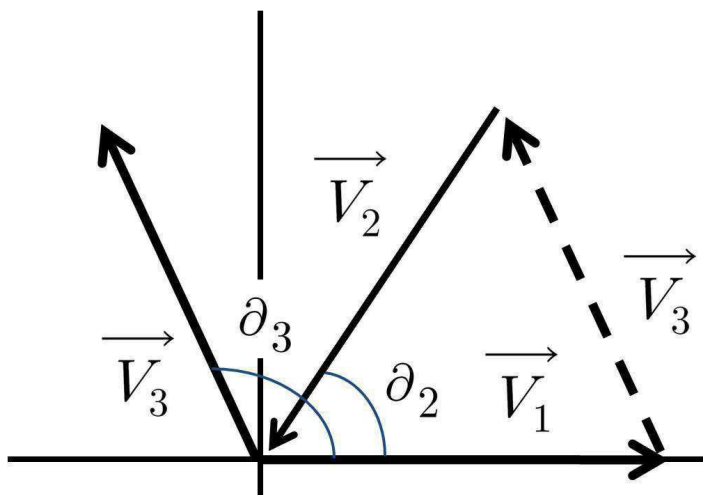
도면3



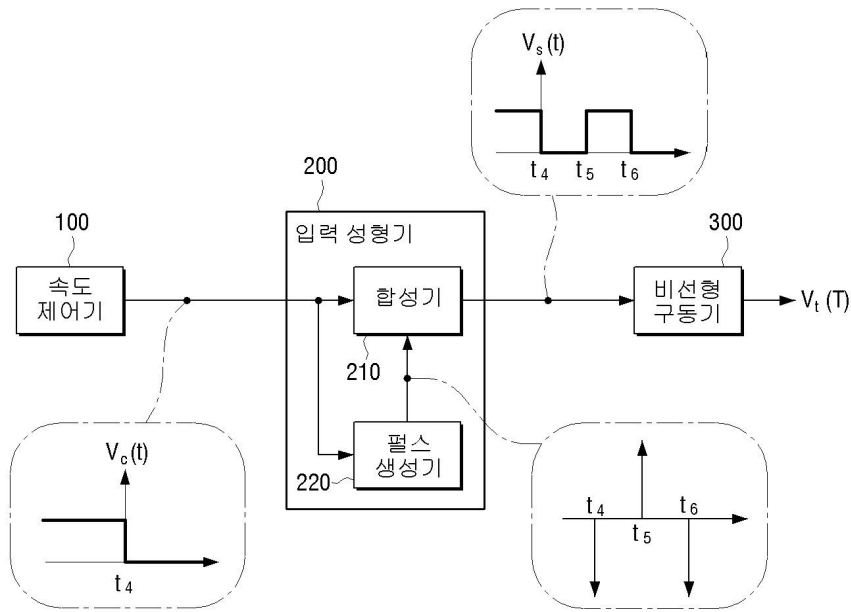
도면4



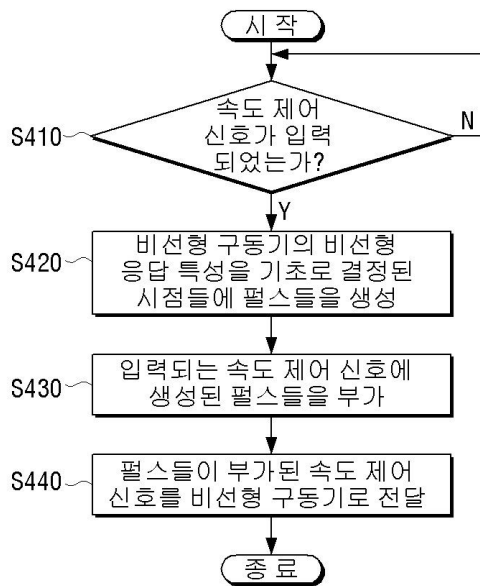
도면5



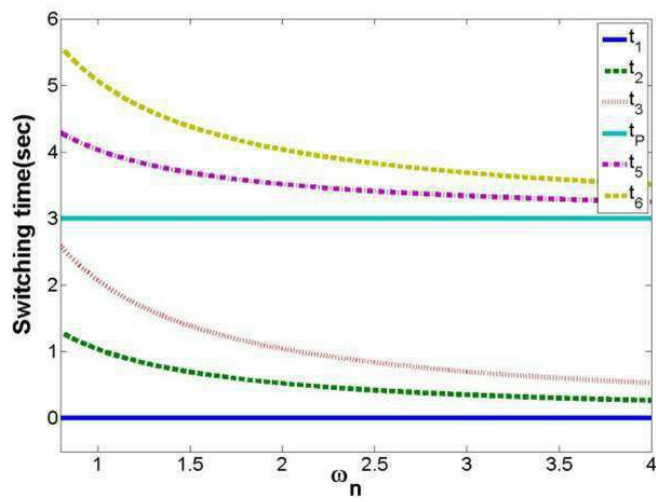
도면6



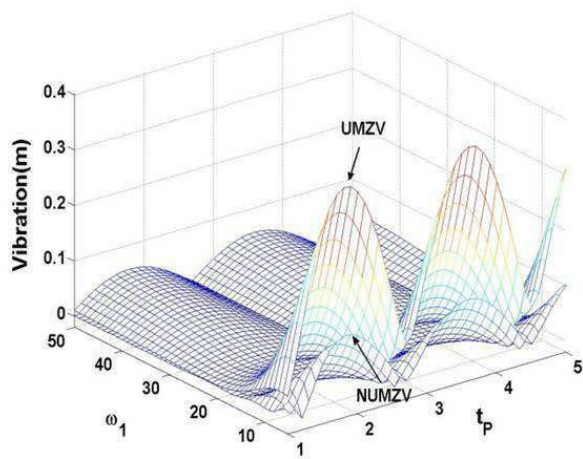
도면7



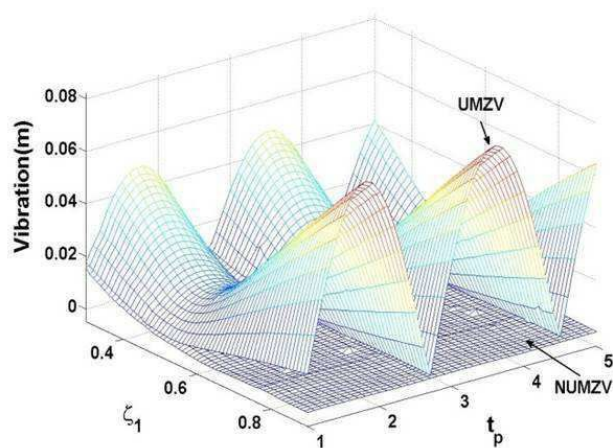
도면8



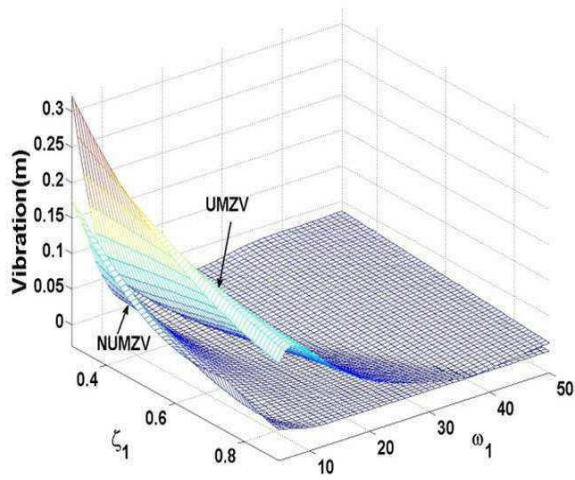
도면9



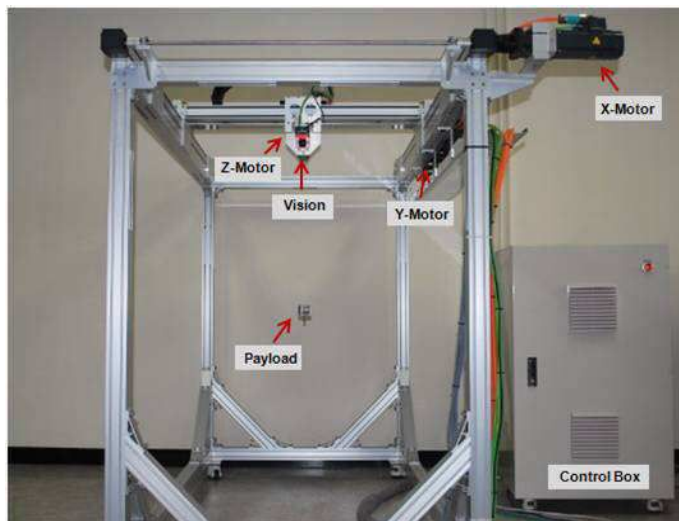
도면10



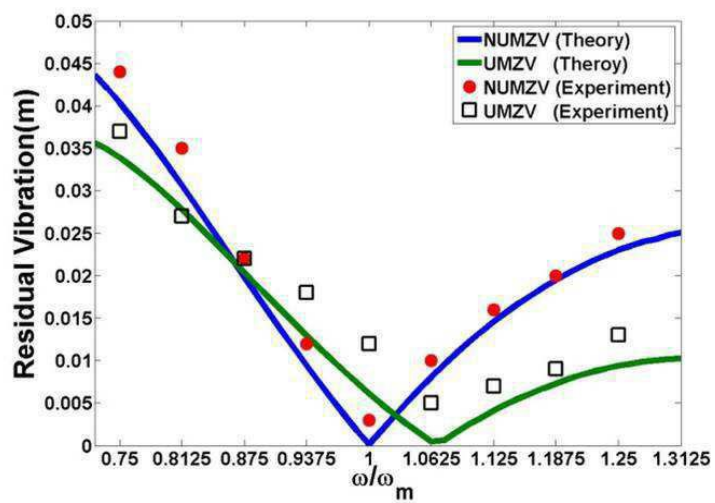
도면11



도면12



도면13



도면14

