



(19) 대한민국특허청(KR)

(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2014년12월29일

(11) 등록번호 10-1477401

(24) 등록일자 2014년12월22일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)

B25J 13/00 (2006.01) *B25J 19/06* (2006.01)

A61H 3/00 (2006.01)

(21) 출원번호 10-2013-0077728

(22) 출원일자 2013년07월03일

심사청구일자 2013년07월03일

(56) 선행기술조사문헌

논문1.2009.2*

KR1020130019533 A*

*는 심사관에 의하여 인용된 문헌

(73) 특허권자

서강대학교산학협력단

서울특별시 마포구 백범로 35 (신수동, 서강대학교)

(72) 발명자

공경철

서울 관악구 봉천로 387, 102동 1304호 (봉천동, 두산아파트)

우한승

경기 고양시 일산서구 킨텍스로 456, 105동 1402호 (일산동, 후곡마을1단지아파트)

(74) 대리인

김준현, 서현, 이재홍, 민복기

전체 청구항 수 : 총 13 항

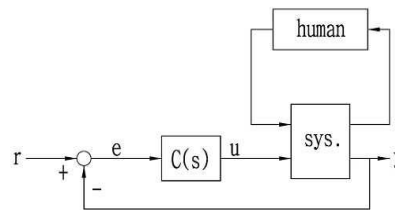
심사관 : 박영근

(54) 발명의 명칭 임피던스가 조절 가능한 메카트로닉 시스템 및 메카트로닉 시스템의 기계적 임피던스를 조절하는 제어방법

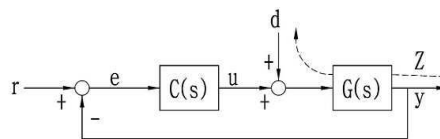
(57) 요약

본 발명은 기계적 임피던스를 조절할 수 있는 메카트로닉 시스템에 관한 것이다.

대표도 - 도1



(a)



(b)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호 NRF-2012R1A1A1008271

부처명 미래창조과학부

연구관리전문기관 (재)한국연구재단

연구사업명 우수심진과제

연구과제명 고속주행로봇을 위한 4족 보행 동물의 상황인지, 주행패턴 및 균형유지방법

기 여 율 1/1

주관기관 (주)한국연구재단

연구기간 2013.05.01 ~ 2014.04.30

특허청구의 범위

청구항 1

사람과 상호 작용에 의해 구동하는 시스템의 기계적 임피던스를 조절하는 제어방법에 있어서,

상기 시스템을 모델링 하는 단계;

상기 모델링된 시스템의 고유특성을 판단하는 단계;

상기 판단된 특성에 따라 상기 시스템을 안정화시키며 단일 파라미터인 임피던스 조절변수에 의해 상기 시스템의 임피던스를 조절하도록 제어기를 설계하는 단계; 및

상기 설계된 제어기에 따라 상기 시스템의 임피던스를 조절하는 단계;를 포함하고,

상기 시스템의 고유특성을 판단하는 단계는 상기 시스템을 구성하는 플랜트의 극점 및 영점이 모두 좌반면에 있는 경우, 영점이 우반면에 있는 경우 및 극점이 우반면에 있는지 여부를 판단하며,

상기 플랜트의 극점 및 영점이 모두 좌반면에 있는 경우에 상기 제어기는 상기 임피던스를 조절하도록 설계되며, 상기 플랜트의 영점이 우반면에 있는 경우 및 극점이 우반면에 있는 경우로 판단되는 경우에 상기 제어기는 상기 임피던스를 조절하면서 상기 시스템을 안정화시키도록 설계되는 것을 특징으로 하는 제어방법.

청구항 2

삭제

청구항 3

삭제

청구항 4

제1항에 있어서,

상기 플랜트($G(s)$)의 극점 및 영점이 모두 좌반면에 있는 경우에 상기 제어기($C(s)$)는

$$C(s) = -qR(s)G^{-1}(s)$$

을 만족하도록 설계되며, 상기 임피던스 조절변수인 'q' 는 0과 1 사이의 양의 스칼라값을 가지며,

$R(s)$ 는 $R(s)G^{-1}(s)$ 를 실현 가능하게 하는 필터에 해당하며 하기 식으로 표현되며,

$$R(s) = \frac{1}{\left(\frac{1}{\tau_0}s + 1\right)^r}$$

상기 $G(s)$ 가 n개의 극점과 m개의 영점을 가지는 경우에 상기 'r' 은 (n-m, 1)의 최대값이며, ' τ_0 ' 은 양의 스칼라 값을 가지는 것을 특징으로 하는 제어방법.

청구항 5

제1항에 있어서,

상기 시스템의 플랜트($G(s)$)가

$$G(s) = \frac{b(s)}{a_s(s)a_u(s)}$$

으로 표현되며,

상기 $a_s(s)$ 및 $b(s)$ 의 근은 모두 복소 평면의 좌반면에 존재하며 상기 $a_u(s)$ 의 근은 복소 평면의 우반면에 존재하는 경우에

상기 제어기($C(s)$)는

$$C(s) = -\frac{qD(s)-U(s)}{qN(s)+V(s)} R(s) \frac{a_s(s)}{b(s)}$$
 을 만족하도록 설계되며, 상기 임피던스 조절변수인 'q' 는 '0' 이 상의 스칼라값을 가지며,

상기 $R(s)$ 는 $R(s) \frac{a_s(s)}{b(s)}$ 를 실현 가능하게 하는 저역필터에 해당하며 하기 식으로 표현되며,

$$R(s) = \frac{1}{\left(\frac{1}{\tau_0}s + 1\right)^r}$$

상기 'r' 은 $\frac{a_s(s)}{b(s)}$ 의 상대차수에 대응한 값을 가지거나, 상기 차수가 '0' 인 경우에 '1' 의 값을 가지며, 'τ₀' 은 양의 스칼라 값을 가지며,

상기 $N(s)$ 와 $D(s)$ 는

$$N(s) = \frac{b_R(s)}{a_T(s)}, D(s) = \frac{a_u(s)a_R(s)}{a_T(s)}$$
 으로 표현되며,

상기 $a_R(s)$ 와 $b_R(s)$ 는 각각 상기 $R(s)$ 의 분모와 분자에 대응하며, 상기 $b_R(s)$ 는 '1' 의 값을 가지며, 상기 $a_T(s)$ 는 $a_u(s)*a_R(s)$ 의 차수를 가지며, 모든 극점과 영점이 복소평면의 좌반면에 존재하는 다항식에 해당하며, 상기 $U(s)$ 와 $V(s)$ 는

$$V(s)D(s)+N(s)U(s)=1$$
 을 만족하는 것을 특징으로 하는 제어방법.

청구항 6

제1항에 있어서,

상기 플랜트($G(s)$)가

$$G(s) = \frac{b_s(s) b_u(s)}{a(s)}$$
 으로 표현되며,

상기 $b_s(s)$ 및 $a(s)$ 의 근은 좌반면에 존재하고, 상기 $b_u(s)$ 의 근이 복소 평면의 우반면에 존재하는 경우에,

상기 제어기($C(s)$)는

$$C(s) = -qR(s) \frac{a(s)}{b_s(s) b_u(-s)}$$
 을 만족하도록 설계되며,

상기 임피던스 조절변수인 'q' 는 0과 1 사이의 양의 스칼라 값이며 상기 $b_u(-s)$ 는 상기 $b_u(s)$ 에 대해 그 근이 복소 평면의 좌반면에 존재하는 상태로 정의되며,

상기 R(s)는 하기 식으로 표현되며,

$$R(s) = \frac{1}{\left(\frac{1}{\tau_0} s + 1\right)^r}$$

상기 'r'은 $\frac{a(s)}{b_s(s)}$ 의 상대차수에 대응하며, ' τ_0 '은 양의 스칼라 값을 가지는 것을 특징으로 하는 제어방법.

청구항 7

제1항에 있어서,

상기 시스템의 모델링의 불확실성 내포 여부를 판단하는 단계를 포함하며, 상기 모델링 불확실성을 내포하는 경우에 상기 제어기는 상기 시스템을 안정화시키면서 상기 임피던스를 감소시키도록 설계하는 것을 특징으로 하는 제어방법.

청구항 8

제7항에 있어서,

상기 시스템의 플랜트(G(s))가

$$G(s) = G_n(s)[1 + W_u(s)\Delta(s)]$$

으로 정의되는 경우에 상기 $G_n(s)$ 는 공칭 플랜트(nominal plant model)에 해당하며, 상기 $W_u(s)\Delta(s)$ 는 각 주파수에서 불확실성의 양을 결정하는 불확실성 함수에 해당하며, $\Delta(s)$ 는 미리 결정된 한계(bounded magnitude)를 가지는 전달함수로 정의되고,

상기 제어기(C(s))는

$$C(s) = -qR(s)G^{-1}(s)$$

을 만족하도록 설계되며,

상기 R(s)는 하기 식으로 표현되며,

$$R(s) = \frac{1}{\left(\frac{1}{\tau_0} s + 1\right)^r}$$

상기 'r'은 상기 $G_n(s)$ 의 상대차수 또는 상기 차수가 0인 경우에 '1'의 값을 가지며,

상기 ' τ_0 '과 임피던스 조절변수인 'q'는

$$|qR(j\omega)| < |(1 - qR(j\omega))W_u^{-1}(j\omega)|$$

을 만족시키는 범위에서 선택되는 것을 특징으로 하는 제어방법.

청구항 9

제8항에 있어서,

상기 시스템의 주파수(w)가 무한대(∞)로 증가하는 경우에 ' $|R(j\infty)=0|$ '을 만족시키게 되므로 'q', R(s)에 관계없이 상기 식인

$|qR(j\omega)| < |(1-qR(j\omega))W_u^{-1}(j\omega)|$ 을 만족시키게 되며,

상기 시스템의 주파수가 '0' 인 경우에

상기 'q' 는

$$0 < q < \frac{1}{W_u(0) + 1}$$

을 만족하도록 선택되며,

상기 ' τ_0 ' 은

$$|W_u(j\tau_0)| < \left| \frac{(1+j)^r - q}{q} \right|$$

을 만족시키도록 선택되며,

상기 $(1+j)^r$ 은 $|R(j\tau_0)|$ 에서 유도되며, 상기 ' τ_0 ' 은 시행착오법에 의해 구해지는 것을 특징으로 하는 제어 방법.

청구항 10

사용자와 상호작용에 의해 구동하며 임피던스가 조절 가능한 메카트로닉 시스템에 있어서,

구동부;

상기 구동부의 구동에 의해 소정의 동작을 수행하는 동작부;

상기 시스템의 수학적 모델링에 따라 임피던스를 조절하는 임피던스 조절수단; 및

상기 구동부와 동작부를 제어하며, 상기 시스템의 고유특성에 따라 상기 시스템을 안정화시키며 단일 파라미터인 임피던스 조절변수에 의해 상기 시스템의 임피던스를 조절하도록 설계된 제어기를 포함하며, 상기 임피던스 조절변수를 조절하는 상기 임피던스 조절수단의 조작에 의해 상기 구동부에 제공되는 구동전압 또는 구동전류를 제어하는 제어부;를 구비하며,

상기 시스템의 고유특성은 상기 시스템을 구성하는 플랜트의 극점 및 영점의 위치에 따라 판단되고, 상기 플랜트의 극점 및 영점이 모두 좌반면에 있는 경우에 상기 제어기는 상기 임피던스를 조절하도록 설계되며, 상기 플랜트의 영점이 우반면에 있는 경우 및 극점이 우반면에 있는 경우로 판단되는 경우에 상기 제어기는 상기 임피던스를 조절하면서 상기 시스템을 안정화시키도록 설계되고,

상기 제어부는 상기 임피던스 조절수단의 조작에 의해 상기 임피던스 조절변수가 변화하는 경우에 상기 제어기에 따라 상기 구동부에 제공되는 구동전압 또는 구동전류를 변화시키는 것을 특징으로 하는 메카트로닉 시스템.

청구항 11

삭제

청구항 12

삭제

청구항 13

제10항에 있어서,

상기 플랜트($G(s)$)의 극점 및 영점이 모두 좌반면에 있는 경우에 상기 제어기($C(s)$)는

$$C(s) = -qR(s)G^{-1}(s)$$

을 만족하도록 설계되며,

상기 임피던스 조절변수인 'q'는 0과 1 사이의 양의 스칼라값을 가지며,

$R(s)$ 는 $R(s)G^{-1}(s)$ 를 실현 가능하게 하는 필터에 해당하며 하기 식으로 표현되며,

$$R(s) = \frac{1}{\left(\frac{1}{\tau_0}s + 1\right)^r}$$

상기 $G(s)$ 가 n 개의 극점과 m 개의 영점을 가지는 경우에 상기 ' r '은 $n-m$ 과 1 중의 최대값이며, ' τ_0 '은 양의 스칼라 값을 가지는 것을 특징으로 하는 메카트로닉 시스템.

청구항 14

제10항에 있어서,

상기 시스템의 플랜트($G(s)$)가

$$G(s) = \frac{b(s)}{a_s(s)a_u(s)}$$

으로 표현되며,

상기 $a_s(s)$ 및 $b(s)$ 의 근은 모두 복소 평면의 좌반면에 존재하며 상기 $a_u(s)$ 의 근은 복소 평면의 우반면에 존재하는 경우에

상기 제어기($C(s)$)는

$$C(s) = -\frac{qD(s) - U(s)}{qN(s) + V(s)} R(s) \frac{a_s(s)}{b(s)}$$

을 만족하도록 설계되며, 상기 임피던스 조절변수인 ' q '는 '0' 이상의 스칼라값을 가지며,

$$R(s) = \frac{a_s(s)}{b(s)}$$

상기 $R(s)$ 는 를 실현 가능하게 하는 저역필터에 해당하며 하기 식으로 표현되며,

$$R(s) = \frac{1}{\left(\frac{1}{\tau_0}s + 1\right)^r}$$

상기 ' r '은 ' $a_s(s)/b(s)$ '의 상대차수에 대응한 값을 가지거나, 상기 차수가 '0'인 경우에 '1'의 값을 가지며, ' τ_0 '은 양의 스칼라 값을 가지며,

상기 $N(s)$ 와 $D(s)$ 는

$$N(s) = \frac{b_R(s)}{a_T(s)}, D(s) = \frac{a_u(s)a_R(s)}{a_T(s)}$$

으로 표현되며, 상기 $a_R(s)$ 와 $b_R(s)$ 는 각각 상기 $R(s)$ 의 분모와 분자에 대응하며, 상기 $b_R(s)$ 는 '1'의 값을 가지며, 상기 $a_T(s)$ 는 $a_u(s) * a_R(s)$ 의 차수를 가지며 모든 극점과 영점이 복소 평면의 좌반면에 존재하는 다항식에 해당하며,

상기 $U(s)$ 와 $V(s)$ 는 ' $V(s)D(s) + N(s)U(s) = 1$ '을 만족하는 것을 특징으로 하는 메카트로닉 시스템.

청구항 15

제10항에 있어서,

상기 플랜트($G(s)$)가

$$G(s) = \frac{b_s(s)b_u(s)}{a(s)}$$

으로 표현되며,

상기 $b_s(s)$ 및 $a(s)$ 의 근은 좌반면에 존재하고, 상기 $b_u(s)$ 의 근이 복소 평면의 우반면에 존재하는 경우에,

상기 제어기($C(s)$)는

$$C(s) = -qR(s) \frac{a(s)}{b_s(s)b_u(-s)}$$

을 만족하도록 설계되며, 상기 임피던스 조절변수인 'q'는 0과 1사이의 양의 스칼라 값이며 상기 $b_u(-s)$ 는 상기 $b_u(s)$ 에 대해 그 근이 복소 평면의 좌반면에 존재하는 상태로 정의되며,

상기 $R(s)$ 는 하기 식으로 표현되며,

$$R(s) = \frac{1}{\left(\frac{1}{\tau_0}s + 1\right)^r}$$

$$\frac{a(s)}{b_s(s)}$$

상기 'r'은 의 상대차수에 대응하며, ' τ_0 '은 양의 스칼라 값을 가지는 것을 특징으로 하는 메카트로닉 시스템.

청구항 16

제10항에 있어서,

상기 플랜트의 극점과 영점이 복소평면의 좌반면에 존재하지만 상기 모델이 불확실성을 내포하는 경우에도 상기 제어기는 상기 임피던스를 감소시키도록 설계되며,

상기 시스템의 플랜트($G(s)$)가

$$G(s) = G_n(s)[1 + W_u(s)\Delta(s)]$$

으로 정의되는 경우에 상기 $G_n(s)$ 는 공칭 플랜트(nominal plant model)에 해당하며, 상기 $[W_u(s)\Delta(s)]$ 는 각 주파수에서 불확실성의 양을 결정하는 불확실성 함수에 해당하며, $\Delta(s)$ 는 미리 결정된 한계(bounded magnitude)를 가지는 전달함수로 정의되고,

상기 제어기($C(s)$)는

$$C(s) = -qR(s)G_n^{(-1)}(s)$$

을 만족하도록 설계되며,

상기 $R(s)$ 는 하기 식으로 표현되며,

$$R(s)=\frac{1}{(\frac{1}{\tau_0}s+1)^r}$$

상기 'r'은 상기 $G_n(s)$ 의 상대차수 또는 상기 차수가 0인 경우에 '1'의 값을 가지며, 상기 ' τ_0 '과 임피던스 조절변수인 'q'는

$$|qR(j\omega)| < |(1-qR(j\omega))W_u^{-1}(j\omega)|$$

을 만족시키는 범위에서 선택되는 것을 특징으로 하는 메카트로닉 시스템.

청구항 17

제16항에 있어서,

상기 시스템의 주파수(ω)가 무한대(∞)로 증가하는 경우에 ' $|R(j\infty)=0|$ '을 만족시키게 되므로 'q', R(s)에 관계없이 상기 식인

$$|qR(j\omega)| < |(1-qR(j\omega))W_u^{-1}(j\omega)|$$

을 만족시키게 되며,

상기 시스템의 주파수가 '0'인 경우에

상기 'q'는

$$0 < q < \frac{1}{W_u(0)+1}$$

을 만족하도록 선택되며,

상기 ' τ_0 '은

$$|W_u(j\tau_0)| < \left| \frac{(1+j)^r - q}{q} \right|$$

을 만족시키도록 선택되며,

상기 $(1+j)^r$ 은 ' $|R(j\tau_0)|$ '에서 유도되며, 상기 ' τ_0 '은 시행착오법에 의해 구해지는 것을 특징으로 하는 메카트로닉 시스템.

명세서

기술분야

[0001]

본 발명은 임피던스가 조절 가능한 메카트로닉 시스템 및 메카트로닉 시스템의 기계적 임피던스를 조절하는 제어방법에 대한 것으로서, 보다 상세하게는 고가의 센서 장치를 사용하지 않으며 나아가 시스템의 고유 특성에 관계없이 시스템의 기계적인 임피던스를 조절할 수 있는 임피던스가 조절 가능한 메카트로닉 시스템 및 메카트로닉 시스템의 기계적 임피던스를 조절하는 제어방법에 관한 것이다.

배경기술

[0002]

일반적으로 어떠한 시스템을 제어하는데 있어 필수적인 요소는 제어 성능과 안정성(Stability)을 들 수 있으며, 나아가, 최근 발달하고 있는 사용자와 물리적으로 상호작용하는 메카트로닉(mechatronic) 시스템에서는 상기 요소 이외에 '안전성(safety)'이 또한 중요한 인자로 작용한다. 이러한 메카트로닉 시스템은 사용자와 상호작용에 의해 구동하게 되므로, 사용자를 보호하기 위한 '안전성'이라는 요소가 필수적이다.

[0003]

여기서, 상기 '안전성'이라는 개념은 사용자가 메카트로닉 시스템에 소정의 동작을 가하는 경우에 가해진 동작에 대한 반발력의 측면에서 판단될 수 있다. 즉, 사용자가 메카트로닉 시스템에 동작을 가하는 경우에 상기 가

해진 동작에 대한 반발력이 상대적으로 작은 경우에 안전하다고 판단할 수 있다.

- [0004] 한편, 상기 메카트로닉 시스템의 반발력은 기계적인 임피던스(mechanical impedance)로 측정될 수 있을 것이다. 즉, 어떠한 시스템의 기계적인 임피던스가 작을수록 상기 시스템은 사용자가 가하는 동작에 대한 반발력이 상대적으로 작으며, 안전하다고 할 수 있다.
- [0005] 사람과 물리적으로 상호작용하는 메카트로닉 시스템의 경우, 사용자가 시스템에 가하는 움직임에 대해서 시스템에 사용자에게 발생시키는 반발력, 즉 임피던스가 지능적으로 제어되어야 한다. 그러한 대표적인 시스템으로 산업용 로봇과 재활 로봇이 있다.
- [0006] 산업용 로봇이 사람과 같은 작업 공간 내에서 기능을 수행하는 경우, 의도치 않게 작업자와 충돌하여 상해를 일으킬 수 있다. 충돌 시 로봇이 작업자에게 가하는 반발력이 작다면, 작업자는 큰 상해를 입지 않을 것이다. 즉, 로봇 시스템의 안전성을 확보하기 위해서는, 충돌 시 로봇 시스템의 기계적인 임피던스를 작도록 제어해야 한다.
- [0007] 재활 로봇은 환자의 재활을 돕는 목적으로 사용되며, 환자의 재활 정도에 따라 환자의 운동에 대해서 로봇이 가하는 반발력이 제어되어야 한다. 즉, 재활 로봇의 기계적인 임피던스를 지능적으로 제어해야 한다.
- [0008] 상기 임피던스를 제어하기 위한 방법으로 힘(force)/토크 모드 제어를 들 수 있다. 상기 방법은 힘 및/또는 토크를 정확하게 측정하여 상기 측정된 값에 따라 제어를 하게 된다. 하지만, 상기 방법은 힘이나 토크를 정확하게 측정하기 위한 고가의 센서 장치를 추가적으로 필요로 하게 된다.
- [0009] 상기 센서 장치를 시스템에 장착하기 위하여 기존 시스템의 설계를 필수적으로 변경하여야 하며, 시스템에 있어서 줄일 수 있는 기계적인 임피던스의 양은 센서의 성능에 좌우된다. 따라서, 정교한 시스템의 구축을 위해서는 고가의 센서 장치를 필요로 하며, 나아가 기존 시스템의 경우에는 별도의 설계 변경 없이는 적용이 불가능하다는 문제점이 있다.

발명의 내용

해결하려는 과제

- [0010] 본 발명은 상기와 같은 문제점을 해결하기 위하여 메카트로닉 시스템 자체의 고유특성에 상관없이 임피던스가 조절 가능한 메카트로닉 시스템 및 메카트로닉 시스템의 기계적 임피던스를 조절하는 제어방법을 제공하는데 목적이 있다. 특히, 불안정한 시스템의 경우에 시스템을 안정화시키는 동시에 기계적인 임피던스를 조절할 수 있는 임피던스가 조절 가능한 메카트로닉 시스템 및 메카트로닉 시스템의 기계적 임피던스를 조절하는 제어방법을 제공하는 것을 해결하고자 하는 과제로 한다.
- [0011] 또한, 본 발명은 상기 과제를 해결하기 위하여 메카트로닉 시스템 자체의 제어 알고리즘을 통하여 임피던스가 조절 가능한 메카트로닉 시스템 및 메카트로닉 시스템의 기계적 임피던스를 조절하는 제어방법을 제공하는 것을 목적으로 한다.
- [0012] 또한, 본 발명은 고가의 센서를 사용하지 않고 메카트로닉 시스템의 기계적인 임피던스를 조절함으로써 안전성을 확보할 수 있는 임피던스가 조절 가능한 메카트로닉 시스템 및 메카트로닉 시스템의 기계적 임피던스를 조절하는 제어방법을 설계하는 방법을 제공하는 것을 목적으로 한다.

과제의 해결 수단

- [0013] 상기 과제를 해결하기 위하여, 본 발명은 사람과 상호 작용에 의해 구동하는 시스템의 기계적 임피던스를 조절하는 제어방법에 있어서, 상기 시스템을 모델링 하는 단계, 상기 모델링된 시스템의 고유특성을 판단하는 단계, 상기 판단된 특성에 따라 상기 시스템을 안정화시키며 단일 파라미터인 임피던스 조절변수에 의해 상기 시스템의 임피던스를 조절하도록 제어기를 설계하는 단계 및 상기 설계된 제어기에 따라 상기 시스템의 임피던스를 조절하는 단계;를 포함하는 것을 특징으로 하는 제어방법을 제공한다.
- [0014] 이 경우, 상기 시스템의 고유특성을 판단하는 단계는 상기 플랜트의 극점 및 영점이 모두 좌반면에 있는 경우, 영점이 우반면에 있는 경우 및 극점이 우반면에 있는지 여부를 판단할 수 있다.
- [0015] 또한, 상기 플랜트의 극점 및 영점이 모두 좌반면에 있는 경우에 상기 제어기는 상기 임피던스를 조절하도록 설계되며, 상기 플랜트의 영점이 우반면에 있는 경우 및 극점이 우반면에 있는 경우로 판단되는 경우에 상기 제어

기는 상기 임피던스를 조절하면서 상기 시스템을 안정화시키도록 설계될 수 있다.

그리고, 상기 플랜트($G(s)$)의 극점 및 영점이 모두 좌반면에 있는 경우에 상기 제어기($C(s)$)는

$C(s) = -qR(s)G^{-1}(s)$ 을 만족하도록 설계되며, 상기 임피던스 조절변수인 'q' 는 (0, 1)의 양의 스칼라 값을 가지며, $R(s)$ 는 $R(s)G^{-1}(s)$ 를 실현 가능하게 하는 필터에 해당하며 하기 식으로 표현되며,

$$R(s) = \frac{1}{\left(\frac{1}{\tau_0}s + 1\right)^r}$$

상기 $G(s)$ 가 n개의 극점과 m개의 영점을 가지는 경우에 상기 'r' 은 (n-m, 1)의 최대값이며, ' τ_0 ' 은 양의 스칼라 값을 가질 수 있다.

$$G(s) = \frac{b(s)}{a_s(s)a_u(s)}$$

그리고, 상기 시스템의 플랜트($G(s)$)가 으로 표현되며,

상기 $a_s(s)$ 및 $b(s)$ 의 근은 모두 복소 평면의 좌반면에 존재하며 상기 $a_u(s)$ 의 근은 복소 평면의 우반면에 존재하는 경우에

$$C(s) = -\frac{qD(s)-U(s)}{qN(s)+V(s)}R(s)\frac{a_s(s)}{b(s)}$$

상기 제어기($C(s)$)는 을 만족하도록 설계되며, 상기 임피던스 조절변수인 'q' 는 '0' 이상의 스칼라값을 가지며,

$$R(s)\frac{a_s(s)}{b(s)}$$

상기 $R(s)$ 는 를 실현 가능하게 하는 저역필터에 해당하며 하기 식으로 표현되며,

$$R(s) = \frac{1}{\left(\frac{1}{\tau_0}s + 1\right)^r}$$

, 상기 'r' 은 $\frac{a(s)}{b_s(s)}$ 의 차수에 대응한 값을 가지거나, 상기 차수가 '0' 인 경우에 '1'의 값을 가지며, ' τ_0 ' 은 양의 스칼라 값을 가지며, 상기 $N(s)$ 와 $D(s)$ 는

$$N(s) = \frac{b_R(s)}{a_T(s)}, D(s) = \frac{a_u(s)a_R(s)}{a_T(s)}$$

으로 표현되며,

상기 $a_R(s)$ 와 $b_R(s)$ 는 각각 상기 $R(s)$ 의 분모와 분자에 대응하며, 상기 $b_R(s)$ 는 '1'의 값을 가지며, 상기 $a_T(s)$ 는 $a_u(s)*a_R(s)$ 의 차수를 가지는 임의의 안정적인 다항식에 해당하며, 상기 $U(s)$ 와 $V(s)$ 는

$V(s)D(s)+N(s)U(s)=1$ 을 만족할 수 있다.

또한, 상기 플랜트($G(s)$)가

$$G(s) = \frac{b_s(s)b_u(s)}{a(s)}$$

으로 표현되며, 상기 $b_s(s)$ 및 $a(s)$ 의 근은 좌반면에 존재하고, 상기 $b_u(s)$ 의 근이 복소 평면의 우반면에 존재하는 경우에,

상기 제어기($C(s)$)는

$$C(s) = -qR(s) \frac{a(s)}{b_s(s) b_u(-s)}$$

[0029] 을 만족하도록 설계되며,

[0030] 상기 임피던스 조절변수인 'q' 는 (0, 1)의 양의 스칼라 값이며 상기 $b_u(-s)$ 는 상기 $b_u(s)$ 의 안정한 상태로 정의되며, 상기 $R(s)$ 는 하기 식으로 표현되며,

$$R(s) = \frac{1}{\left(\frac{1}{\tau_0} s + 1\right)^r}$$

[0031]

[0032] 상기 'r' 은 $\frac{a(s)}{b_s(s)}$ 의 차수에 대응하며, ' τ_0 ' 은 양의 스칼라 값을 가질 수 있다.

[0033] 여기서, 상기 시스템의 모델링의 불확실성 내포 여부를 판단하는 단계를 포함하며, 상기 모델링 불확실성을 내포하는 경우에 상기 제어기는 상기 임피던스를 감소시키면 상기 불확실성을 줄이도록 설계할 수 있다.

$$G(s) = G_n(s) [1 + W_u(s) \Delta(s)]$$

[0034] 또한, 상기 시스템의 플랜트($G(s)$)가 으로 정의되는 경우에 상기 $G_n(s)$ 는 공칭 플랜트(nominal plant model)에 해당하며, 상기 $W_u(s) \Delta(s)$ 는 모델링 불확실성 함수에 해당하며,

[0035] 상기 제어기($C(s)$)는

$$C(s) = -qR(s) G^{-1}(s)$$

[0036] 을 만족하도록 설계되며,

[0037] 상기 $R(s)$ 는 하기 식으로 표현되며,

$$R(s) = \frac{1}{\left(\frac{1}{\tau_0} s + 1\right)^r}$$

[0038]

[0039] 상기 'r' 은 상기 $G_n(s)$ 의 차수 또는 상기 차수가 0인 경우에 '1'의 값을 가지며, 상기 ' τ_0 ' 과 임피던스 조절변수인 'q' 는

$$|qR(j\omega)| < |(1 - qR(j\omega))W_u^{-1}(j\omega)|$$

[0040] 을 만족시키는 범위에서 선택될 수 있다.

[0041] 이 경우, 상기 시스템의 주파수가 '0'인 경우에

[0042] 상기 'q' 는

$$0 < q < \frac{1}{W_u(0) + 1}$$

[0043] 을 만족하도록 선택되며,

[0044] 상기 ' τ_0 ' 은

$$|W_u(j\tau_0)| < \left| \frac{(1+j)^r - q}{q} \right|$$

[0045] 을 만족시키도록 선택되며,

[0046] 상기 ' τ_0 ' 은 시행착오법에 의해 구해질 수 있다.

[0047] 또한, 본 발명은 상기 과제를 해결하기 위하여, 사용자와 상호작용에 의해 구동하며 임피던스가 조절 가능한 메

카트로닉 시스템에 있어서, 구동부, 상기 구동부의 구동에 의해 소정의 동작을 수행하는 동작부, 상기 시스템의 수학적 모델링에 따라 임피던스를 조절하는 임피던스 조절수단 및 상기 구동부와 동작부를 제어하며, 상기 시스템의 고유특성에 따라 상기 시스템을 안정화시키며 단일 파라미터인 임피던스 조절변수에 의해 상기 시스템의 임피던스를 조절하도록 설계된 제어기를 포함하며, 상기 임피던스 조절변수를 조절하는 상기 임피던스 조절수단의 조작에 의해 상기 구동부에 제공되는 구동전압 또는 구동전류를 제어하는 제어부를 구비하는 메카트로닉 시스템을 제공할 수 있다.

[0048] 이 경우, 상기 제어부는 상기 임피던스 조절수단의 조작에 의해 상기 임피던스 조절변수가 변화하는 경우에 상기 제어기에 따라 상기 구동부에 제공되는 구동전압 또는 구동전류를 변화시킬 수 있다.

[0049] 또한, 상기 시스템의 고유특성은 상기 시스템을 구성하는 플랜트의 극점 및 영점의 위치에 따라 판단되고, 상기 플랜트의 극점 및 영점이 모두 좌반면에 있는 경우에 상기 제어기는 상기 임피던스를 조절하도록 설계되며, 상기 플랜트의 영점이 우반면에 있는 경우 및 극점이 우반면에 있는 경우로 판단되는 경우에 상기 제어기는 상기 임피던스를 조절하면서 상기 시스템을 안정화시키도록 설계될 수 있다.

[0050] 그리고, 상기 플랜트($G(s)$)의 극점 및 영점이 모두 좌반면에 있는 경우에 상기 제어기($C(s)$)는

[0051]
$$C(s) = -qR(s)G^{-1}(s)$$
 을 만족하도록 설계되며,

[0052] 상기 임피던스 조절변수인 'q'는 (0, 1)의 양의 스칼라값을 가지며,

[0053] $R(s)$ 는 $R(s)G^{-1}(s)$ 를 실현 가능하게 하는 필터에 해당하며 하기 식으로 표현되며,

[0054]
$$R(s) = \frac{1}{\left(\frac{1}{\tau_0}s + 1\right)^r}$$

[0055] 상기 $G(s)$ 가 n개의 극점과 m개의 영점을 가지는 경우에 상기 'r'은 n-m과 1 중의 최대값이며, ' τ_0 '은 양의 스칼라 값을 가질 수 있다.

[0056] 또한, 상기 시스템의 플랜트($G(s)$)가

[0057]
$$G(s) = \frac{b(s)}{a_s(s)a_u(s)}$$
 으로 표현되며,

[0058] 상기 $a_s(s)$ 및 $b(s)$ 의 근은 모두 복소 평면의 좌반면에 존재하며 상기 $a_u(s)$ 의 근은 복소 평면의 우반면에 존재하는 경우에

[0059] 상기 제어기($C(s)$)는

[0060]
$$C(s) = -\frac{qD(s)-U(s)}{qN(s)+V(s)}R(s)\frac{a_s(s)}{b(s)}$$
 을 만족하도록 설계되며, 상기 임피던스 조절변수인 'q'는 '0' 이상의 스칼라값을 가지며,

[0061] 상기 $R(s)$ 는
$$R(s) = \frac{a_s(s)}{b(s)}$$
 를 실현 가능하게 하는 저역필터에 해당하며 하기 식으로 표현되며,

[0062]
$$R(s) = \frac{1}{\left(\frac{1}{\tau_0}s + 1\right)^r}$$

[0063] 상기 'r'은 ' $a_s(s)/b(s)$ '의 차수에 대응한 값을 가지거나, 상기 차수가 '0'인 경우에 '1'의 값을 가지며, ' τ_0

0'은 양의 스칼라 값을 가지며,

[0064] 상기 N(s)와 D(s)는

$$N(s) = \frac{b_R(s)}{a_T(s)}, D(s) = \frac{a_u(s)a_R(s)}{a_T(s)}$$

[0065] 으로 표현되며, 상기 aR(s)와 bR(s)는 각각 상기 R(s)의 분모와 분자에 대응하며, 상기 bR(s)는 '1'의 값을 가지며, 상기 aT(s)는 aU(s)* aR(s)의 차수를 가지는 임의의 안정적인 다항식에 해당하며,

[0066] 상기 U(s)와 V(s)는 'V(s)D(s)+N(s)U(s)=1'을 만족할 수 있다.

[0067] 여기서, 상기 플랜트(G(s))가

$$G(s) = \frac{b_s(s)b_u(s)}{a(s)}$$

[0068] 으로 표현되며,

[0069] 상기 bs(s) 및 a(s)의 근은 좌반면에 존재하고, 상기 bu(s)의 근이 복소 평면의 우반면에 존재하는 경우에,

[0070] 상기 제어기(C(s))는

$$C(s) = -qR(s) \frac{a(s)}{b_s(s)b_u(-s)}$$

[0071] 을 만족하도록 설계되며, 상기 임피던스 조절변수인 'q'는 0과 1사이의 양의 스칼라 값이며 상기 bu(-s)는 상기 bu(s)의 안정한 상태로 정의되며,

[0072] 상기 R(s)는 하기 식으로 표현되며,

$$R(s) = \frac{1}{\left(\frac{1}{\tau_0} s + 1\right)^r}$$

[0073] 상기 'r'은 $\frac{a(s)}{b_s(s)}$ 의 차수에 대응하며, 'τ0'은 양의 스칼라 값을 가질 수 있다.

[0074] 그리고, 상기 플랜트의 극점과 영점이 복소평면의 좌반면에 존재하지만 상기 모델이 불확실성을 내포하는 경우에도 상기 제어기는 상기 임피던스를 감소시키도록 설계되며, 상기 시스템의 플랜트(G(s))가

$$G(s) = G_n(s)[1 + W_u(s)\Delta(s)]$$

[0075] 으로 정의되는 경우에 상기 는 공칭 플랜트(nominal plant model)에 해당하며, 상기 $[W_u(s)\Delta(s)]$ 는 모델링 불확실성 함수에 해당하며,

[0076] 상기 제어기(C(s))는

$$C(s) = -qR(s)G_n^{(-1)}(s)$$

[0077] 을 만족하도록 설계되며, 상기 R(s)는 하기 식으로 표현되며,

$$R(s) = \frac{1}{\left(\frac{1}{\tau_0} s + 1\right)^r}$$

상기 'r'은 상기 $G_n(s)$ 의 차수 또는 상기 차수가 0인 경우에 '1'의 값을 가지며, 상기 ' τ_0 '과 임피던스 조절변수인 'q'는

$$|qR(j\omega)| < |(1 - qR(j\omega))W_u^{-1}(j\omega)|$$

을 만족시키는 범위에서 선택될 수 있다.

또한, 상기 시스템의 주파수가 '0'인 경우에 상기 'q'는

$$0 < q < \frac{1}{W_u(0) + 1}$$

을 만족하도록 선택되며,

상기 ' τ_0 '은

$$|W_u(j\tau_0)| < \left| \frac{(1+j)^r - q}{q} \right|$$

을 만족시키도록 선택될 수 있다.

발명의 효과

본 발명에 따른 임피던스가 조절 가능한 메카트로닉 시스템 및 메카트로닉 시스템의 기계적 임피던스를 조절하는 제어방법에 의하면, 사용자와 상호작용하는 소정의 시스템에 있어서 고유의 임피던스를 용이하게 조절할 수 있다.

또한, 본 발명에 따른 임피던스가 조절 가능한 메카트로닉 시스템 및 메카트로닉 시스템의 기계적 임피던스를 조절하는 제어방법에 의하면, 별도의 센서를 필요치 않으므로 기계적인 디자인에 있어서 어떠한 변형도 수반하지 않을 수 있다.

또한, 본 발명에 따른 임피던스가 조절 가능한 메카트로닉 시스템 및 메카트로닉 시스템의 기계적 임피던스를 조절하는 제어방법에 의하면, 고가의 센서 등의 추가적인 장치 등의 기존 시스템 변경 없이 시스템의 기계적인 임피던스를 효과적으로 조절하고 동시에 시스템의 안정성(stability)을 보장할 수 있게 된다.

또한, 본 발명에 따른 임피던스가 조절 가능한 메카트로닉 시스템 및 메카트로닉 시스템의 기계적 임피던스를 조절하는 제어방법에 의하면, 시스템의 기계적인 임피던스를 원하는 대역폭에 대해서 효과적으로 감소시킬 수 있다.

결과적으로, 또한, 본 발명에 따른 임피던스가 조절 가능한 메카트로닉 시스템 및 메카트로닉 시스템의 기계적 임피던스를 조절하는 제어방법에 의하면, 소정의 메카트로닉 시스템의 기계적인 마찰을 크게 감소시켜 역구동성(backdrivability)을 높일 수 있으며, 나아가 소정의 구동장치를 매개로 하여 동작하는 모든 시스템에 적용 가능하다.

도면의 간단한 설명

도 1은 사용자와 상호작용하는 메카트로닉 시스템의 블록전도를 도시하며,

도 2는 본 발명에 따른 제어방법을 도시한 순서도,

도 3은 상기 도 1의 시스템의 수학적 모델이 불안정한 극점과 영점을 모두 갖지 않는 경우에 기계적인 임피던스가 감소하는 시뮬레이션 결과를 도시한 그래프이며,

도 4는 상기 도 1의 시스템의 수학적 모델이 불안정한 극점을 갖는 경우에 시스템이 안정화됨과 동시에 기계적인 임피던스가 감소함을 보여주는 시뮬레이션 결과를 도시한 그래프이며,

도 5는 상기 도 1의 시스템의 수학적 모델이 불안정한 영점을 갖는 경우에 기계적인 임피던스가 감소하는 시뮬레이션 결과를 도시한 그래프이며,

도 6은 본 발명에 따른 제어방법 설계 방법을 적용하기 위한 팔꿈치 보조장치와 3축 로봇을 도시하며,

도 7은 상기 도 6의 팔꿈치 보조장치의 수학적 모델을 구하기 위한 주파수 응답선도와 모델 불확실도를 도시한 그래프이며,

도 8은 상기 팔꿈치 보조장치에 본 발명에 따른 제어방법을 적용한 결과 기계적인 임피던스가 감소하였음을 보여주는 사용자의 상완근의 근전도 신호를 도시한 그래프이며,

도 9(a)는 3축 로봇 시스템의 수학적 모델을 구하기 위한 주파수 응답선도를 도시한 그래프이며, 도 9(b)는 모델 불확실도를 도시한 그래프이며,

도 10(a)는 3축 로봇의 제2 암의 관절 각도를 도시하며, 도 10(b)는 3축 로봇에 본 발명에 따른 제어방법을 적용한 결과 기계적인 임피던스가 감소하였음을 보여주는 로드셀에 의한 신호를 도시한 그래프이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

- [0095] 이하, 첨부된 도면들을 참조하여 본 발명의 바람직한 실시예들을 상세히 설명하기로 한다. 그러나, 본 발명은 여기서 설명된 실시예들에 한정되지 않고 다른 형태로 구체화될 수도 있다. 오히려, 여기서 소개되는 실시예들은 개시된 내용이 철저하고 완전해질 수 있도록, 그리고 당업자에게 본 발명의 사상이 충분히 전달될 수 있도록 하기 위해 제공되는 것이다. 명세서 전체에 걸쳐서 동일한 참조번호들은 동일한 구성요소들을 나타낸다.
- [0096] 이하, 기계적인 임피던스(이하, '임피던스'라 함)는 후술하는 메카트로닉 시스템에서 사용자의 동작에 대해 메카트로닉 시스템이 발생시키는 저항력(resistive forces)의 크기로 정의한다.
- [0097] 그런데, 상기 임피던스에 의한 시스템의 안정성 판단은 안정한(stable) 시스템에서만 유효하다. 불안정한 시스템은 외란에 보다 민감하게 반응하게 되며, 외란에 의해 유도된 초기 속도 방향으로 계속하여 움직이며 저항력을 발생시키지 않기 때문이다.
- [0098] 따라서, 소정의 시스템의 임피던스를 조절하기 위해서는 상기 시스템을 안정화시키는 과정도 필요하게 된다.
- [0099] 대부분의 메카트로닉 시스템은 피드백 제어에 의해 운영되며, 따라서 폐루프 시스템의 기계적인 임피던스가 개루프 시스템의 임피던스에 비해 상대적으로 더 중요하게 된다. 도 1(a)는 단일입력 및 단일출력의 피드백 제어(feedback-controlled) 시스템의 블록 다이어그램이며, 도 1(b)는 상기 도 1(a)를 단순화한 도면이다.
- [0100] 도 1을 참조하면, 기본적으로 시스템은 제어대상인 플랜트(plant, $G(s)$)와 제어기(controller, $C(s)$)를 구비한다. 예를 들어, '재활 로봇'의 일종인 팔꿈치 보조 장치 등이 제어대상(플랜트)에 해당하며, 제어기($C(s)$)는 제어 알고리즘에 따라 신호를 내보내는 장치로 정의된다. 도 1에 따른 블록선도에서 제어기($C(s)$)와 플랜트($G(s)$)는 각각 ' $C(s)$ '와 ' $G(s)$ '로 표시되며 단순한 단일입력-단일출력의 피드백제어 시스템의 기계적인 임피던스 모델은 도 1(a)와 같다.
- [0101] 도 1의 변수 ' r ', ' e ', ' u ', ' y ', ' v ', ' f ', ' $C(s)$ ', ' $G(s)$ '는 각각 기준 입력, 추종 오차, 제어 입력, 시스템 출력, 속도 입력(사용자가 시스템에 가하는 동작), 상기 속도 입력에 의해 유도되는 저항력, 피드백 제어기 및 플랜트를 나타낸다. 사용자와 물리적으로 상호작용하는 메카트로닉 시스템의 경우, 외부에서 시스템에 가해지는 속도 입력(v)과 시스템 출력(y)은 구속되어 있다.
- [0102] 즉, 기계와 사용자의 몸이 붙어서 같은 속도로 움직이는 경우를 상정할 수 있으며, 재활 장치로서 사용자의 동작을 보조하기 위한 팔꿈치 보조 장치와 사용자의 팔을 일 예로 들 수 있다.
- [0103] 이러한 메카트로닉 시스템의 복잡한 특성은 시스템의 해석을 어렵게 하므로 도 1(a)는 도 1(b)와 같이 단순화될 수 있다. 즉, 외부에서 시스템에 가해지는 속도 입력(v)에 의해 메카트로닉 시스템에 의하여 유도되는 저항력(f)은 외부에서 시스템에 가하는 가상의 외란(d)로 가정될 수 있다.
- [0104] 도 1(b)에서 시스템의 임피던스는 시스템 출력(y)에서 가상의 외란(d)까지의 전달함수가 되며, 하기 [수학적 1]로 정의된다.

수학식 1

$$Z(\omega) = |G_{y \rightarrow d}(j\omega)|$$

하지만, 상기 $G_{y \rightarrow d}(j\omega)$ 는 블록 다이어그램을 해석하는데 있어서 전형적인 방법이 아니며, $G_{d \rightarrow y}(j\omega)$ 가 도 1(b)에서 외란(d)에 대한 시스템 출력(y)의 전형적인 전달함수에 해당한다. 따라서, 상기 $G_{y \rightarrow d}(j\omega)$ 는 $G_{d \rightarrow y}^{-1}(j\omega)$ 로 전환될 수 있으며, 결국, 기계적인 임피던스는 상기 시스템에 작용하는 외란에 대한 출력의 역 전달함수로 표현될 수 있으며, 하기 [수학식 2]로 표현될 수 있다.

수학식 2

$$Z(\omega) = |G_{y \rightarrow d}(j\omega)| = \left| \frac{1 + G(j\omega)C(j\omega)}{G(j\omega)} \right|$$

결국, 기계적인 임피던스는 시스템의 플랜트($G(s)$)와 피드백 제어기($C(s)$)에 의해 결정되는 것을 알 수 있다. 이 경우 제어기는 가장 단순한 되먹임 제어기의 형태를 가지며, 시스템의 수학적 모델이 가질 수 있는 네 가지 경우에 따라 다른 방법으로 설계되며, 각 제어기 설계 방법은 상기 시스템의 기계적 임피던스를 감소시킴과 동시에 안정성을 보장하게 된다. 이후에 구체적으로 살펴본다.

상기와 같은 시스템은 소정의 조건들을 내포하고 있는 바, 이하 살펴해보도록 한다.

먼저, 상기 시스템이 안정(stable)하다고 가정하면, 기계적 임피던스의 최대값은 무한대(∞)에 수렴하게 된다. 시스템이 안정한 경우에 $G(\infty)$ 의 값은 0이므로, ω 가 무한대(∞)로 갈수록 상기 기계적 임피던스의 값은 무한대(∞)에 수렴하게 된다.

그리고, 상기 시스템이 안정(stable)하다고 가정하면, 기계적 임피던스의 최소값은 0 보다 큰 값을 가지게 된다. 시스템이 안정한 경우에 페루프의 특성 방정식(characteristic equation)은 복소 평면 상에서 우반면(right-half complex plane)에 어떠한 근도 가지지 않기 때문에 결과적으로 기계적 임피던스의 최소값은 0 보다 큰 값을 가지게 된다.

한편, 잘 알려진 바와 같이 제어 성능은 전 주파수 영역에서 향상될 수 없으며, 일부 주파수 영역에서 임피던스가 감소한다면 다른 주파수 영역에서 임피던스는 증가하는 성향을 갖게 된다.

또한, 사용자와 상호 작용하는 메카트로닉 시스템과 같은 경우에 사용자의 동작의 복잡성으로 인해 시스템 모델링에 불확실성(uncertainty)을 포함하게 되며, 이러한 경우에도 피드백 제어기는 시스템을 안정화시키면서 임피던스를 줄이는 기능을 해야 한다.

불확실성이 포함된 시스템에서 플랜트는 하기 [수학식 3]과 같이 수학적으로 표현할 수 있다.

수학식 3

$$G(s) = G_n(s) [1 + W_u(s) \Delta(s)]$$

상기 [수학식 3]에서 $G_n(s)$ 는 공칭 플랜트(nominal plant model), $W_u(s)$ 는 각 주파수에서 불확실성의 양을 결정하는 불확실성 가중 함수(uncertainty weighting function), $\Delta(s)$ 는 소정의 한계(bounded magnitude)를 가지는 임의의 전달 함수로 정의될 수 있다. 만약 ' $\|W_u T\|_\infty < 1$ '의 조건을 만족한다면 피드백 제어기($C(s)$)는 [수학식 3]으로 표현되는 불확실성 범위 내의 모든 플랜트 모델을 안정화시키게 된다. 여기서, $T(s)$ 는 상보감도함수(complementary sensitivity function)에 해당하며, 하기 [수학식 4]로 표현된다.

수학식 4

$$T(s) = \frac{G(s)C(s)}{1+G(s)C(s)}$$

따라서, 시스템의 안정화 조건은 다음과 같다.

수학식 5

$$|C(j\omega)W_u(j\omega)| < Z(\omega) \text{ for all } \omega \in R_+$$

결과적으로, 상기 불확실성 가중 함수의 값이 작은 주파수 영역에서는 임피던스를 줄일 수 있으며, 반대로 불확실성 가중 함수의 값이 크거나 제어기의 값이 큰 주파수 영역에서는 임피던스가 커짐을 알 수 있다. 임피던스를 최소화하기 위해서는 제어기의 이득(gain)이 가능한 작은 값을 가져야 하며, 따라서 임피던스와 제어 성능 사이에는 트레이드-오프(trade-off)관계가 성립하는 것을 알 수 있다. 즉, 제어 성능을 높이는 경우에는 임피던스가 상대적으로 커지게 되며, 반대로 임피던스를 줄이게 되면 제어 성능이 상대적으로 떨어지게 된다. 나아가, 제어기의 이득은 불안정한 극점(unstable poles)을 가지는 시스템에 대해서 현저히 작은 값을 가질 수 없으며, 이는 불안정한 시스템에 대해서 임피던스의 하한값이 존재하는 것을 의미한다.

종래의 제어 이론에서는 추종 오차(tracking error)와 외란을 효과적으로 줄일 수 있는 고이득 제어(high gain control)가 선호되었다. 하지만, 사용자와 상호작용하는 메카트로닉 시스템의 경우에 사용자의 동작도 시스템의 입장에서는 외란의 하나로 간주되므로 상기 고이득 제어는 바람직하지 않거나, 사용자 보호의 안전성 측면에서는 불리할 수 있다.

즉, 메카트로닉 시스템에서는 제어성능이 높아질수록 임피던스도 또한 커지게 된다. 따라서, 메카트로닉 시스템의 경우에는 전술한 트레이드-오프를 고려하여 임피던스를 줄이려고 하는 피드백 제어기의 설계가 필요하다고 할 수 있다.

만약 시스템이 불안정하다면, 시스템을 안정화시키는 것도 피드백 제거기의 역할에 포함될 것이다.

도 2는 본 발명에 따른 제어방법을 도시한 순서도이다.

도 2를 참조하면, 본 발명에 따른 제어방법은 시스템을 모델링 하는 단계(S210), 상기 모델링된 시스템의 고유특성을 판단하는 단계(S230), 상기 시스템의 임피던스를 감소시키며, 상기 판단된 특성에 따라 상기 시스템을 안정화시키도록 제어기를 설계하는 단계(S250) 및 상기 설계된 제어기에 따라 상기 시스템의 임피던스를 조절하는 단계(S270)를 포함하게 된다.

본 발명에 따르면 먼저 소정의 시스템을 모델링하게 된다(S210). 여기서, 상기 시스템은 전술한 바와 같이 사용자와 상호작용에 의해 구동하는 소위 메카트로닉 시스템으로 구성될 수 있지만, 이에 한정되지는 않으며 사용자와 상호작용에 의해 구동하는 어떠한 시스템이라도 가능하다.

상기 시스템을 모델링하는 경우에 일반적으로 '주파수 응답법'을 사용하게 된다. 상기 주파수 응답법은 입력값의 주파수를 변화시키면서 출력값의 진폭과 위상을 측정하여 시스템을 표현하는 수학적 모델, 즉 전달함수의 파라미터들을 구하는 것으로서, 본 발명이 속하는 기술분야에서 널리 알려져 있으므로 구체적인 설명을 생략한다.

이어서, 상기 시스템의 모델링에 의해 시스템의 고유특성을 판단하게 된다(S230). 여기서, 시스템의 고유특성이라 함은 주어진 시스템이 가지는 고유한 성질을 의미하는 것으로서, 상기 시스템을 구성하는 플랜트의 극점 및/또는 영점의 위치에 따라 판단하게 된다. 예를 들어, 플랜트의 극점 및 영점이 모두 복소평면의 좌반면에 있으면 플랜트가 안정하게 되며, 플랜트의 극점이 복소평면의 우반면에 있게 되면 플랜트가 불안정하게 되며, 플랜트가 안정하지만 복소평면의 우반면에 영점을 가질 수 있다.

이어서, 상기 판단된 시스템의 고유 특성에 따라 시스템을 안정화시키도록 제어기를 설계하게 된다(S250).

- [0130] 여기서, 상기 제어기는 단일 파라미터인 임피던스 조절변수(q)에 의해 조절 가능하도록 설계될 수 있다. 즉, 여러 개의 변수를 제어하는 것이 아니라 단일변수 또는 단일 파라미터만을 조절하여 임피던스를 조절하게 된다.
- [0131] 예를 들어, 플랜트의 극점 및 영점이 모두 복소평면의 좌반면에 있어 플랜트가 안정하게 되면, 시스템이 안정하므로 임피던스만 조절되도록 제어기를 설계하면 된다.
- [0132] 그런데, 플랜트의 극점이 복소평면의 우반면에 있어 플랜트가 불안정하게 되면, 임피던스를 조절할 뿐만 아니라 시스템을 안정화시키도록 제어기를 설계해야 한다. 플랜트가 복소평면의 우반면에 영점을 가지는 경우에는 시스템이 비록 안정하지만 시스템이 불안정한 경우와 마찬가지로 임피던스를 조절할 뿐만 아니라 시스템을 안정화시키도록 제어기를 설계할 수 있다.
- [0133] 한편, 본 발명에 따른 제어방법은 시스템 모델링의 불확실성을 포함하는지를 판단하는 단계를 더 포함할 수 있다. 여기서, 모델링 불확실성은 시스템에 포함되는 마찰 또는 백래쉬(backlash)와 같은 비선형성으로 표현될 수 있으며, 실제로 대부분의 메카트로닉 시스템이 모델링 불확실성을 내포하게 된다. 따라서, 이러한 경우에 제어기는 상기 불확실성을 줄이면서 임피던스를 조절하도록 설계된다.
- [0134] 이어서, 상기 설계된 제어기에 따라 상기 단일 파라미터를 조절하여 상기 시스템의 임피던스를 조절하게 된다(S270).
- [0135] 이하에서는 시스템의 다양한 고유 특성, 즉 안정한 시스템, 불안정한 시스템, 모델링 불확실성을 포함하는 시스템에 대해서 임피던스를 조절하면서 나아가 시스템을 안정화시킬 수 있는 제어방법, 즉 제어기(C(s))의 설계에 대해서 구체적으로 살펴보기로 한다.

[0136] A. 플랜트(G(s))가 안정한 경우

[0137] 단일입력 및 단일출력의 플랜트(G(s))가 n개의 극점과 m개의 영점을 가지며, 상기 극점과 영점 중에 어느 하나도 복소평면의 우반면에 없는 경우를 상정해 본다. 이 경우, 피드백 제어기(C(s))는 단지 임피던스를 줄이는 기능만을 수행하면 된다. 즉, 관성, 댐핑, 마찰 등과 같은 기계적인 요인에 의한 임피던스는 시스템의 안정성을 유지하는 피드백 제어에 의해 감소된다. 시스템이 안정한 경우에 피드백 제어기를 하기 [수학식 6]과 같이 설계할 수 있다.

수학식 6

[0138]
$$C(s) = -qR(s)G^{-1}(s)$$

[0139] 여기서, 임피던스 조절변수인 'q'는 (0, 1)까지의 양(positive)의 스칼라(scalar) 값이며, R(s)는 $R(s)G^{-1}(s)$ 를 실현 가능하게 하는 필터에 해당하며, 하기 [수학식 7]로 표현된다.

수학식 7

[0140]
$$R(s) = \frac{1}{\left(\frac{1}{\tau_0}s + 1\right)^r}$$

[0141] 여기서 'r'은 n-m과 1 중 최대값이며, ' τ_0 '은 양의 스칼라 값이다. 이 경우, ' $\|R\|_{\infty}=1$ '을 만족하게 되며 R(s)는 ' τ_0 '의 컷오프(cur-off) 주파수를 가지는 저역 필터(low-pass filter)에 해당한다.

[0142] 상기 [수학식 6]과 [수학식 2]를 조합해보면 페루프 시스템의 임피던스는 하기 [수학식 8]로 표현된다

수학식 8

$$Z(\omega) = \left| \frac{1 - qR(j\omega)}{G(j\omega)} \right|$$

결국, 상기 [수학식 7]에서 만약 임피던스 조절변수인 'q' 값이 1에 근접하면 임피던스의 크기는 저주파수 영역, 즉 ' τ_0 ' 보다 작은 주파수 영역에서 0에 가까울 것이다. 하지만, 전술한 바와 같이 시스템이 안정(stable)한 경우에 기계적 임피던스의 최소값은 0 보다 큰 값을 가지게 되어 0의 값을 가질 수 없으므로 맥 값은 1이 될 수 없다.

B. 플랜트($G(s)$)가 불안정한 경우

사용자와 상호작용하는 많은 메카트로닉 시스템은 복소평면의 우반면에 극점을 가질 수 있다. 이와 같이, 만약 플랜트가 불안정한 극점을 가지게 되면, 피드백 제어기는 임피던스를 감소시킬 뿐만 아니라 시스템을 안정화시키는 기능을 동시에 수행해야 한다. 상기 [수학식 6]에 따른 피드백 제어기는 불안정한 시스템을 안정화시키는 기능을 수행하지 못한다. 따라서, 시스템이 불안정한 경우에는 상기 [수학식 6]과 다른 제어기의 설계를 필요로 한다.

만약 시스템이 불안정한 극점, 즉 복소 평면의 우반면에 극점을 가지는 경우라 하여도 임피던스를 감소시키기 위하여 제어기($C(s)$)에 플랜트($G(s)$)의 역수를 포함시켜 플랜트의 동적특성을 제거할 수 있다. 하지만, 내재적인 안정성(internal stability)은 불안정한 극점의 제거에 의해 보장되지 않으므로 극영점 상쇄(pole-zero cancellation)에 의해 불안정한 동적특성을 제거하는 것은 불가능하다.

결국, 플랜트가 불안정한 경우에 플랜트($G(s)$)를 하기 [수학식 9]와 같이 상정해본다.

수학식 9

$$G(s) = \frac{b(s)}{a_s(s) a_u(s)}$$

여기서, $a_s(s)$ 및 $b(s)$ 의 근은 모두 복소 평면의 좌반면에 존재하며, $a_u(s)$ 의 근은 복소 평면의 우반면에 존재하게 된다. 즉, $a_s(s)$ 와 $a_u(s)$ 는 각각 플랜트의 안정부와 불안정부를 표현한다. 이러한 경우에 피드백 제어기($C(s)$)는 하기 [수학식 10]과 같이 설계될 수 있다.

수학식 10

$$C(s) = -Q(s)R(s) \frac{a_s(s)}{b(s)}$$

여기서, $R(s)$ 는 전술한 [수학식 7]과 동일하지만, 'r'은 ' $a_s(s)/b(s)$ '의 차수(relative degree)에 대응한다. 즉, $R(s)$ 는 ' $R(s)(a_s(s)/b(s))$ '를 실현 가능하게 하는 저역 필터에 해당한다. 만약 ' $a_s(s)/b(s)$ '의 차수가 '0'이라고 하면 r'은 '1'의 값을 갖는다. $Q(s)$ 는 상기 폐루프가 안정되고 상기 임피던스가 감소하도록 설계될 수 있다.

$N(s)$ 와 $D(s)$ 를 S에 대한 ' $R(s)(1/a_u(s))$ '의 소인수분해(coprime factorization)라고 가정하면, $N(s)$ 와 $D(s)$ 는 하기 [수학식 11]으로 표현될 수 있다.

수학식 11

$$N(s) = \frac{b_R(s)}{a_T(s)} \text{ and } D(s) = \frac{a_u(s) a_R(s)}{a_T(s)}$$

[0154]

[0155]

여기서, $a_R(s)$ 와 $b_R(s)$ 는 각각 $R(s)$ 의 분모와 분자에 해당한다. 전술한 [수학식 7]에서 $b_R(s)$ 는 정의에 의해 '1'의 값을 갖는다. 한편, $a_T(s)$ 는 $a_U(s) * a_R(s)$ 의 차수를 가지는 임의의 안정적인 다항식에 해당한다. 만약 $N(s)$ 와 $D(s)$ 가 서로에 대해 서로소라고 하면, 하기 [수학식 12]의 'Bezout identity'를 만족시키는 $U(s)$ 와 $V(s)$ 가 존재한다.

수학식 12

$$V(s)D(s) + N(s)U(s) = 1$$

[0156]

[0157]

이 경우, $Q(s)$ 의 소인수분해는 하기 [수학식 13]와 같다.

수학식 13

$$Q(s) = \frac{N_q(s)}{D_q(s)}$$

[0158]

[0159]

상기 [수학식 13]에서 각 분자와 분모는 안정(stable)하며 분자의 차수는 분모의 차수보다 크지 않다는 점을 유의해야 한다. 한편, 상기 [수학식 11]과 [수학식 13]의 정의에 의해 외란(d)과 출력(y)의 전달함수는 하기 [수학식 14]과 같다.

수학식 14

$$G_{d \rightarrow y}(s) = \frac{\frac{b(s) a_R(s)}{a_s(s) a_T(s)} D_q(s)}{D_q(s) D(s) - N_q(s) N(s)}$$

[0160]

[0161]

하기 [수학식 15]를 만족시키는 $D_q(s)$ 와 $N_q(s)$ 가 존재하는 경우에만, 상기 폐루프 시스템이 안정하게 된다.

수학식 15

$$D_q(s) D(s) - N_q(s) N(s) = 1$$

[0162]

[0163]

전술한 [수학식 12]을 상기 [수학식 15]에 대입하면 하기의 [수학식 16]을 얻을 수 있다.

수학식 16

$$[D_q(s) - V(s)]D(s) - [N_q(s) + U(s)]N(s) = 0$$

상기 [수학식 16]는 어떠한 스칼라 값 'q'에 대해서도 $D_q(s) - V(s) = qN(s)$ 와 $N_q(s) + U(s) = qD(s)$ 만족시키는 경우에 유지된다. 상기 [수학식 13]에 의해 플랜트(G(s))를 안정화시키는 피드백 제어기는 하기 [수학식 17]으로 표현된다.

수학식 17

$$C(s) = -\frac{qD(s) - U(s)}{qN(s) + V(s)} R(s) - \frac{a_s(s)}{b(s)}$$

상기 제어기(C(s))는 전술한 [수학식 15]의 조건을 만족하므로 상기와 같이 설계된 제어기를 구비하는 경우에 상기 폐루프 시스템은 항상 안정하다.

상기 [수학식 17]에서 임피던스는 하기 [수학식 18]과 같이 계산된다.

수학식 18

$$Z(j\omega) = \left| \frac{a_s(j\omega)}{b(j\omega)} - \frac{R(j\omega)}{[qN(j\omega) + V(j\omega)]N(j\omega)} \right|$$

상기 [수학식 18]에서 임피던스 조절변수인 'q'를 증가시킴으로써 임피던스를 감소시킬 수 있다. 이 경우, 안정한 시스템의 [수학식 6]에 표현된 제어기의 설계와 달리 상기 'q' 값에는 상한이 없다. 나아가, [수학식 10]의 제어기는 'q' 값이 0인 경우에도 정의될 수 있으며, 이는 어떠한 경우에도 제어기가 시스템을 안정화시키기 위한 최소의 제어입력을 제공하는 것을 의미한다.

C. 플랜트(G(s))가 우반면에 영점을 가지는 경우

한편, 시스템이 안정한 경우에도 복소 평면의 우반면에 영점을 가질 수 있다. 이 경우, 제어기는 내적 안정성으로 인해 시스템의 동적특성을 제거할 수 없다.

수학식 19

$$G(s) = \frac{b_s(s) b_u(s)}{a(s)}$$

예를 들어, 시스템의 플랜트(G(s))가 상기 [수학식 19]과 같은 경우에 $b_s(s)$ 및 $a(s)$ 의 근은 좌반면에 존재하고, $b_u(s)$ 의 근은 우반면에 존재하는 경우를 상정해 본다.

수학식 20

$$C(s) = -Q(s)R(s) \frac{a(s)}{b_s(s)}$$

[0175]

[0176]

여기서, R(s)는 전술한 [수학식 7]과 동일하지만, 'r'은 'a(s)/b_s(s)'의 차수(relative degree)에 대응한다. 따라서, 페루프 시스템은 하기 [수학식 21]을 만족하는 경우에 안정하게 된다.

수학식 21

$$1 - Q(s)R(s)b_u(s) \neq 0 \text{ for all } \operatorname{Re}(s) \geq 0$$

[0177]

[0178]

개루프 시스템이 안정하기 때문에 저이득 정리(small gain theorem)가 적용될 수 있다. 즉, 상기 [수학식 21]에 따른 조건은 하기 [수학식 22]의 경우에 만족될 수 있다.

수학식 22

$$\|Q(j\omega)R(j\omega)b_u(j\omega)\|_\infty < 1$$

[0179]

[0180]

즉, 만약 모든 주파수 영역에서 $|Q(j\omega)|$ 이 $|R(j\omega)b_u(j\omega)|^{-1}$ 에 비해 작게 된다면 페루프 시스템이 안정하게 된다.

[0181]

이 경우, 임피던스는 하기 [수학식 23]와 같다.

수학식 23

$$Z(\omega) = \left| \frac{1 - Q(j\omega)R(j\omega)b_u(j\omega)}{G(j\omega)} \right|$$

[0182]

[0183]

저주파수 대역에서 임피던스를 줄이기 위해서는 ' ω '의 값이 0인 경우에 $Q(j\omega)R(j\omega)b_u(j\omega)$ 의 값이 $1 + 0j$ 에 근접해야 한다. 따라서, Q(s)는 $qb_u^{-1}(-s)$ 로 선택될 수 있다. 여기서, 임피던스 조절변수인 'q'는 0과 1 사이의 양의 스칼라 값이며 b_u(-s)는 b_u(s)의 안정한 상태로 정의된다. 결국, 복소평면의 우반면에 영점을 가지는 플랜트의 임피던스를 줄이기 위한 피드백 제어기는 하기 [수학식 24]과 같이 설계될 수 있다.

수학식 24

$$C(s) = -qR(s) \frac{a(s)}{b_s(s)b_u(-s)}$$

[0184]

[0185]

D. 모델링 불확실성을 가진 플랜트(G(s))

[0186]

실제 많은 메카트로닉 시스템은 마찰, 백래쉬(backlash)와 같은 비선형성(nonlinearities)으로 인해 모델링 불

확실성을 포함하게 된다. 모델과 실제 시스템의 불일치성은 상기 모델링 불확실성으로 설명될 수 있다. 메카트로닉 시스템의 전달함수를 상기 [수학식 3]의 형태로 상정한 경우, 단순화를 위해 명목상의 플랜트 모델이 우반면 어디에도 극점 및 영점을 가지지 않는 것으로 가정한다. 이 경우, 피드백 제어기는 하기 [수학식 25]와 같이 설계될 수 있다.

수학식 25

$$C(s) = -qR(s)G_n^{-1}(s)$$

여기서, $R(s)$ 는 상기 [수학식 7]과 동일하며, $r'G_n(s)$ 의 차수 또는 상기 차수가 0인 경우에 '1'의 값을 갖는다. 그런데, 모델링 불확실성을 포함하는 경우에 $R(s)$ 의 컷오프 주파수(τ_0)는 신중하게 선택되어야 한다.

페루프 시스템의 특성 다항식(characteristic polynomial)은 $1 - qR(s) - qR(s)W_u(s)\Delta(s)$ 이다. 저이득 정리(small gain theorem)에 따르면, 상기 페루프 시스템은 하기 [수학식 26]을 만족시키는 경우에 안정하다.

수학식 26

$$\left\| \frac{qR}{1 - qR} W_u \right\|_{\infty} < 1$$

즉, 전 주파수 영역에서 $|qR(j\omega)| < |(1 - qR(j\omega))W_u^{-1}(j\omega)|$ 를 만족시키는 경우에 페루프 시스템은 안정하게 된다. 따라서, 'q'와 $R(s)$ 의 ' τ_0 '은 상기 [수학식 26]을 만족시키도록 선택되어야 한다.

' $|R(j\omega)| \neq 0$ '을 만족시키게 되므로 ω 가 무한대(∞)로 증가하는 경우에 'q', $R(s)$ 에 관계없이 상기 [수학식 26]을 만족시키게 된다. 하지만, ω 가 '0'인 경우에 상기 임피던스 조절변수 'q'는 하기 [수학식 27]을 만족시키도록 선택되어야 한다.

수학식 27

$$0 < q < \frac{1}{W_u(0) + 1}$$

한편, 기계적인 임피던스는 'q'의 값이 1에 수렴하는 경우에 최소가 된다. 그런데, $W(s)$ 의 경계 안에서 시스템이 모델링 불확실성을 포함한다면, 'q'의 값은 $(W_u(0) + 1)^{-1}$ 의 값보다 커질 수 없다. 만약 '0' 주파수에서 모델링 불확실성이 크다면, 'q'는 작아져야 하며, 임피던스는 효과적으로 감소되지 않을 것이다.

일반적으로 $W_u(j\omega)$ 는 고역 필터(high-pass filter)에 해당하며, 따라서 저주파 영역에서는 작은 값을 가지지만 고주파 영역에서는 상대적으로 큰 값을 가지게 된다. 'q'는 상기 [수학식 27]을 만족시키도록 선택되므로 $R(s)$ 의 컷오프 주파수는 하기 [수학식 28]을 만족하도록 선택된다.

수학식 28

$$|W_u(j\tau_0)| < \left| \frac{(1+j)^r - q}{q} \right|$$

여기서, $(1+j)^r$ 은 $|R(j\tau_0)|$ 에서 유도된다. 상기 [수학식 28]에서 오른쪽은 명확하게 정의되었으므로 컷오프 주파수(τ_0)는 시행착오법(trial-and-error method)에 의해 구해질 수 있다.

E. 실제 사례

전술한 바와 같이, 실제 시스템의 플랜트($G(s)$)는 극점 및/또는 영점의 위치, 또는 시스템 모델링에 따른 불확실성에 의해 구분할 수 있으며, 상기 각 경우에 임피던스를 조절할 수 있는 제어기($C(s)$)의 설계가 가능하다. 특히, 상기 모든 경우에 있어서 상기 제어기는 하나의 단일 파라미터인 임피던스 조절변수(q)에 의해 조절이 가능하게 된다. 구체적으로, 상기 제어기의 설계 이후에 상기 임피던스 조절변수를 변화시키게 되면 상기 제어기를 통해 플랜트($G(s)$)로 입력되는 제어입력이 변화하게 되며, 이는 실제로 시스템의 플랜트에 입력되는 구동전압(또는 구동전류)의 변화로 나타난다.

결국, 시스템의 고유특성에 따라 단일 파라미터인 임피던스 조절변수(q)를 구비하는 제어기($C(s)$)를 설계하고, 상기 임피던스 조절변수(q)의 조절에 의해 각 제어기($C(s)$)를 통해 플랜트로 입력되는 제어입력신호를 조절하여 상기 시스템의 임피던스를 조절할 수 있게 된다.

실제 시스템을 구현하는 경우에 상기 임피던스 조절변수(q)는 다양한 방법으로 조절 가능하게 제공되는데, 예를 들어 시스템에 조그셔틀(jog & shuttle) 등과 같은 임피던스 조절수단을 구비하여 상기 임피던스 조절수단의 조작에 의해 상기 임피던스 조절변수가 변화되도록 구현할 수 있다.

이하에서는 시스템의 고유 특성에 따라 제어기를 설계하고, 나아가 상기 임피던스 조절변수의 조절에 의한 임피던스의 조절 방법을 구체적인 예로 살펴본다.

(1) 안정한 플랜트

도 3은 플랜트($G(s)$)가 하기 [수학식 29]로 정의되는 경우에 임피던스 조절변수인 ' q ' 값의 변화에 따른 임피던스의 변화를 도시한 그래프이다. 도 3(a)는 컷오프 주파수(τ_0)가 10 rad/s인 경우이며, 도 3(b)는 컷오프 주파수(τ_0)가 100 rad/s 인 경우를 도시한다.

수학식 29

$$G(s) = \frac{1}{s^2 + s + 1}$$

상기 플랜트 모델은 안정하므로, 제어기(Controller)는 상기 [수학식 6]과 같이 설계될 수 있다. 상기 $G(s)$ 의 차수가 '2'이므로, $R(s)$ 는 하기 [수학식 30]와 같이 설계된다.

수학식 30

$$R(s) = \frac{1}{\left(\frac{1}{\tau_0} s + 1\right)^2}$$

[0207]

[0208]

$R(s)$ 의 컷오프 주파수의 효과를 확인하기 위하여 컷오프 주파수(τ_0)는 두 가지 값, 예를 들어 10 rad/s 및 100 rad/s로 실험하였다. 도 3에 도시된 바와 같이 상기 두 가지 컷오프 주파수의 경우에 모두 임피던스 조절변수인 'q'가 증가함에 따라 임피던스가 감소하였으며, 임피던스 조절변수인 'q'가 감소함에 따라 임피던스가 증가하였음을 알 수 있다. 한편, 'q' 값이 '0.95'인 페루프 시스템에서 'q' 값이 '0'인 개루프 시스템에 비해 보다 명확하게 임피던스를 감소시킬 수 있다. 나아가, 도 3에 도시된 바와 같이 임피던스가 명확하게 감소하는 주파수 영역은 컷오프 주파수(τ_0)에 따라 변화한다. 하지만, 컷오프 주파수(τ_0)가 증가함에 따라 더 큰 제어 입력(u)이 발생된다. 따라서, 피드백 제어의 경우에 실제적인 이슈를 고려하여 원하는 주파수 영역에서 임피던스를 줄일 수 있도록 $R(s)$ 의 컷오프 주파수(τ_0)가 적절히 조절될 필요가 있다.

[0209]

(2) 불안정한 플랜트

[0210]

플랜트가 상기 [수학식 9]로 정의되며, $b(s)$ 가 ' $s + 5$ ', $a_s(s)$ 가 ' $s^2 + 4s + 6$ ', $a_u(s)$ 가 ' $s - 1$ '이라고 하면 플랜트($G(s)$)는 하기 [수학식 31]으로 정의된다.

수학식 31

$$G(s) = \frac{s+5}{(s-1)(s^2+4s+6)}$$

[0211]

[0212]

' $b(s)/a_s(s)$ '의 차수가 '1'이므로, $R(s)$ 는 하기 [수학식 32]로 표현된다.

수학식 32

$$R(s) = \frac{1}{0.01s+1}$$

[0213]

[0214]

상기 개루프 시스템은 불안정하므로, 제어기는 전술한 '플랜트가 불안정한 경우'에서 설명한 바와 같이 설계된다. $G(s)$ 의 소인수분해를 위해 임의의 안정한 다항식($a_T(s)$)가 필요하다. 전술한 [수학식 11]에서 $N(s)$ 와 $D(s)$ 의 분자는 각각 '1'과 ' $0.01s^2 + 0.99s - 1$ '에 해당한다. $a_T(s)$ 는 제어기의 단순화를 위해 ' $0.01s^2 + 0.99s + 1$ '로 상정된다. 이 경우, $V(s)$ 와 $U(s)$ 는 각각 '1'과 '2'로 계산된다. 결국, 피드백 제어기는 전술한 [수학식 10]와 같이 설계될 수 있으며, 그 결과가 도 4에 도시된다.

[0215]

도 4(a)는 전술한 시스템에서 임피던스의 감소를 도시하며, 도 4(b)는 페루프 극점의 위치를 도시한다.

[0216]

도 4(a)를 참조하면, 임피던스 조절변수인 'q'가 증가함에 따라 임피던스가 현저히 감소함을 알 수 있으며, 반대로 임피던스 조절변수인 'q'가 감소하게 되면 임피던스가 증가함을 알 수 있다. 또한, 'q' 값이 '1000'일 때, 전술한 제어기를 가지는 시스템의 페루프 극점이 도 4(b)에 도시된다. 시스템의 임피던스를 크게 감소시키면서도, 페루프 시스템의 극점이 모두 좌반면에 존재하여 안정한 것을 알 수 있다.

[0217] (3) 우반면에 영점을 가지는 플랜트

[0218] 전술한 [수학식 19]에서 $b_s(s)$ 는 ' $s + 3$ ', $b_u(s)$ 는 ' $s - 50$ ', $a(s)$ 는 ' $s^2 + 4s + 6$ ' 이라고 하면, 플랜트($G(s)$)는 하기 [수학식 33]로 표현된다.

수학식 33

$$G(s) = \frac{(s+3)(s-50)}{s^2+4s+6}$$

[0219]

[0220] ' $b(s)/a_s(s)$ '의 차수가 '1'이므로 $R(s)$ 의 ' r '은 '1'에 해당한다. 여기서, 컷오프 주파수(τ_0)를 임의로 100 rad/s로 정하면 $R(s)$ 는 하기 [수학식 34]과 같다.

수학식 34

$$R(s) = \frac{1}{0.01s+1}$$

[0221]

[0222] 상기 [수학식 33]의 시스템에 대한 제어기는 전술한 [수학식 20]와 같이 설계될 수 있다. 도 5는 본 예에 대한 그래프를 도시한다. 도 5에 도시된 바와 같이, 소정의 주파수 영역에서 임피던스 조절변수인 ' q '값이 증가함에 따라 임피던스가 감소하며, 상기 임피던스 조절변수인 ' q ' 값이 감소함에 따라 임피던스가 증가함을 알 수 있다. 또한, 제어기의 성능은 플랜트의 우반면 영점의 위치에 따라 좌우되며, 상기 영점의 위치는 제어기에 의해 변화될 수 없다. 따라서, 임피던스는 원하는 바와 같이 저주파수 영역에서는 감소되지만, 일부 주파수 영역에서는 커질 수 있다.

[0223] (4) 모델링 불확실성을 가지는 플랜트

[0224] 모델링 불확실성을 가지는 시스템에 대한 제어기는 도 6에 도시된 바와 같은 시스템을 통한 실험 결과로 확인할 수 있다. 시스템의 전달함수는 제어기의 설계를 위해 필요하며, 시스템을 구성하는 플랜트의 전달함수를 구하기 위해 일반적으로 주파수 응답법이 활용된다. 도 6(A)는 전술한 '팔꿈치 보조 장치'(10)를 도시하며, 도 6(B)는 3축 로봇(20)을 도시한다. 상기 팔꿈치 보조 장치와 3축 로봇의 동적특성은 기어의 마찰 및 인체의 동작으로 인해 모델링 불확실성을 포함하게 된다. 따라서, 전술한 경우의 제어기 설계는 적합하지 않으며, [수학식 25]에 따른 제어기 설계가 적용될 수 있다. 이하, 순차적으로 살펴본다.

[0225] a. 팔꿈치 보조 장치

[0226] 도 6(A)에서 팔꿈치 보조 장치(10)는 AC 기어모터(16), 상부팔 버팀부(12) 및 하부팔 버팀부(14)를 포함한다. 상기 AC 기어모터(16)는 토크 제어 모드(torque control mode)이며, 모터의 회전각은 엔코더에 의해 측정되었다. 상기 시스템의 전달함수를 구하기 위하여 주파수 응답법이 활용되었으며, 도 7(a)에 도시된다. 시스템의 파라미터를 해석하기 위하여 [0.5 100] Hz의 범위를 가지는 주파수 영역에서 sine-by-sine method가 수행되었다. 팔꿈치 보조 장치의 기계적인 구조를 고려하면 공칭 플랜트(nominal plant model) $G_n(s)$ 는 하기 [수학식 35]로 구해진다.

수학식 35

$$G_n(s) = \frac{105}{s^2 + 105s}$$

이 경우, 모델링 불확실성은 [수학식 3]에서 하기와 같이 구해진다.

수학식 36

$$W_u(j\omega) \triangleq (j\omega) = \frac{G(j\omega) - G_n(j\omega)}{G_n(j\omega)}$$

상기 [수학식 36]에서 모델링 불확실성의 크기는 도 7(b)에 도시된다. 제어기의 설계를 하는 경우에 'q'와 컷오프 주파수(τ_0)를 결정하기 위한 모델링 불확실성의 경계를 구하는 것이 필요하다. 모델링 불확실성의 경계는 실험에 의해 구해진 모델링 불확실성의 크기보다 소정치만큼 크도록 고안될 수 있다. 그런데, 제어기의 성능이 $W_u(j\omega)$ 의 크기에 의해 제한되므로 상기 $W_u(j\omega)$ 의 크기는 현저히 크지 않아야 한다. 결과적으로, 적절한 모델링 불확실성의 경계는 하기 [수학식 37]과 같다.

수학식 37

$$W_u(s) = \frac{2.3(s+35)}{s+45}$$

상기 식에 따른 불확실성의 경계는 도 7(b)에서 연속된 라인으로 도시된다.

제어기의 설계를 위해 'q'와 R(s)의 컷오프 주파수(τ_0)는 안정성 조건을 만족시키도록 결정되어야 한다. $W_u(j\omega)$ 의 dc-이득이 1.789이므로, 상기 시스템은 'q'값이 0.359 이하인 경우에만 안정할 것이다. $W_u(j\omega)$ 의 최대값

이 2.300이지만, 'r'은 '2'이며 $\left| \frac{(1+j)^r - q}{-q} \right|$ 는 'q'값이 0과 0.359 사이의 값을 갖는 경우에 항상 2.3보다 큰 값을 갖는다. 따라서, 컷오프 주파수(τ_0)는 임의의 값으로 정해질 수 있으며, 이 경우 제어기는 하기 [수학식 38]로 설계될 수 있다.

수학식 38

$$C(s) = -\frac{q}{\left(\frac{1}{\tau_0}s + 1\right)^2} \frac{s(s+105)}{105}$$

이 경우, 상기 장치 등의 임피던스 조절변수는 상대적으로 높은 값으로 조절될 수 있으며, 이에 따라 임피던스를 감소시켜 착용자가 큰 저항력을 느끼지 않고 운동을 하는 것이 가능하다.

반대로, 재활의 말기 또는 경미한 부상을 입은 사용자가 상기 장치 등을 착용하는 경우를 살펴본다. 이 경우,

상기 장치는 착용자에게 적절한 저항력을 제공하여 운동능력의 회복에 도움을 주어야 한다. 따라서, 이 경우에는 상기 장치 등의 임피던스 조절변수를 상대적으로 작은 값으로 조절하여 임피던스를 크게 하는 대신, 제어성능을 높이게 된다.

[0237]

한편, 상기 재활장치 또는 의료장치의 임피던스 조절변수는 상기 장치 등에 구비된 조절수단, 예를 들어 조그서틀 등에 의해 조절되도록 제공될 수 있다. 즉, 상기 조그서틀의 조절에 의해 상기 임피던스 조절변수를 조절하고 이에 의해 임피던스 및 제어성능을 조절할 수 있게 된다.

[0238]

b. 3축 로봇

[0239]

도 6(B)는 AC 기어 모터에 의해 구동하는 세 개의 관절을 구비한 3축 로봇(20)을 개시한다. 상기 3축 로봇은 제1 암(22), 제2 암(24) 및 제3 암(26)을 구비한다. 한편, 상기 전기 모터, 각종 센서(엔코더 등) 및 다른 전자장비는 전술한 팔꿈치 보조 장치와 동일하다. 나아가, 3축 로봇은 상기 제2 암(24)에 로드셀(30)을 구비하여 외부에서 가해지는 상호작용력(즉, 로봇암에 의해 발생하는 저항력)을 측정하였다. 전술한 바와 같이 임피던스는 인체의 동작에 의해 유발되는 저항력의 크기로 양적으로 측정될 수 있다. 상기 로드셀은 제어기의 성능을 보다 객관적으로 입증할 수 있다. 도 9(a)는 3축 로봇 시스템의 수학적 모델을 구하기 위한 주파수 응답선도를 도시하며, 도 9(b)는 모델 불확실도를 도시한다.

[0240]

본 실험에서 제어기는 오직 제2 암(24)에만 적용되었다. 따라서, [0.1 100] Hz의 범위를 가지는 주파수 영역에서 상기 제2 암(24)의 파라미터를 해석하기 위하여 sine-by sine method 가 적용되었다. 상기 제2 암(24)의 공칭 플랜트(nominal plant model) $G_n(s)$ 는 하기 [수학식 39]로 구해진다.

수학식 39

$$G_n(s) = \frac{0.565s^2 + 26.3s + 694.4}{s^3 + 101.7s^2 + 407s + 113.2}$$

[0241]

[0242]

상기 공칭 플랜트와 실험적인 데이터에 의해 모델링 불확실성은 도 9(b)에 도시된 바와 같이 각 주파수에 대응하여 계산될 수 있다. 도 7(B)와 상기 [수학식 37]에서 설명한 바와 같이, 모델링 불확실성의 경계는 하기 [수학식 40]으로 선택될 수 있다.

수학식 40

$$W_u(s) = \frac{s+70}{s+69.5}$$

[0243]

[0244]

여기서, 상기 식에 따른 불확실성의 경계는 도 9(b)에서 연속된 라인으로 도시된다.

[0245]

제어기의 설계를 위해 $R(s)$ 의 'q'와 컷오프 주파수(τ_0)는 안정성 조건을 만족시키도록 결정되어야 한다. $W_u(j\omega)$ 의 dc-이득이 1.007이므로, 상기 시스템은 'q'값이 0.498 이하인 경우에만 안정할 것이다.

는 'r'값이 '1'의 값을 갖는 경우에 항상 $W_u(j\omega)$ 의 최대값인 1.007보다 큰 값을 갖는다. 따라서, 컷오프 주파수(τ_0)는 임의의 값으로 정해질 수 있으며, 이 경우 3축 로봇의 제2 암에 대한 제어기는 하기 [수학식 41]로 설계될 수 있다.

$$\left| \frac{(1+j)^r - q}{q} \right|$$

수학식 41

$$C(s) = -\frac{q}{\frac{1}{\tau_0} s + 1} \frac{s^3 + 101.7s^2 + 407s + 113.2}{0.565s^2 + 26.3s + 694.4}$$

[0246]

[0247]

상기 실험에서, 실험자가 3축 로봇의 제2 암을 밀어서 상기 제2 암에 설치된 로드셀에 힘을 가하였다. 제어기는 제2 암에 적용되었지만, 제1 암 및 제3 암의 회전 위치는 PID 제어기에 의해 조절되었다. 상기 동작의 주파수 대역폭(bandwidth)에 따른 컷오프 주파수(τ_0)는 10 Hz로 설정되었다. 'q' 값이 '0'인 경우를 포함하여 5가지 값을 가지는 'q'에 대해서 실험하였다. 대략 1.7초에 제2 암이 대략 45도의 변위를 가지도록 실험자가 제2 암을 미는 동작을 반복하였다. 도 10(a)는 3축 로봇의 상기 실험에서 제2 암의 관절 각도를 도시하며, 도 10(b)는 로드셀에 의한 신호를 도시한다. 상기 도 10(a)에 도시된 바와 같이 제2 암의 관절에 의한 시간 응답은 서로 상이한 값을 가지는 'q'에 대해서도 매우 유사하다. 이는 실험자가 제2 암에 가하는 동작이 모든 실험에서 매우 유사함을 의미한다. 그런데, 상기 로봇에서 발생하는 저항력의 크기는 도 10(b)에 도시된 바와 같이 'q' 값이 커짐에 따라 현저히 감소함을 알 수 있다. 상기 로드셀 신호의 RMS 값이 하기 [표 1]에 도시된다.

표 1

[0248]

'q' 값	RMS 값(kgf)
0	2.749
0.1	2.629
0.2	2.540
0.3	1.925
0.35	1.843

[0249]

상기 [표 1]을 살펴보면 'q' 값이 0인 경우에 비해서 'q' 값이 0.35인 경우에 저항력이 대략 33%정도 감소하였음을 알 수 있다. 다시 말해서, 본 실험에서 임피던스 감소 제어기는 성공적으로 3축 로봇의 고유 임피던스를 감소하였음을 알 수 있다. 이러한 감소된 고유 임피던스에 의해 실험자는 보다 적은 힘으로 로봇을 미는 것이 가능해진다.

[0250]

한편, 상기 3축 로봇과 같이 사용자가 직접 착용하지는 않지만, 사용자와 상호작용에 의해 구동하는 장치의 경우에 상황에 따라 상기 임피던스 조절변수의 값을 조절할 필요가 있다.

[0251]

예를 들어, 상기 장치가 정상적으로 구동하는 경우에는 상기 장치에 의해 정확한 동작을 구현하는 것이 중요하므로 제어성능을 높이는 것이 필요하다. 따라서, 이러한 경우에는 상기 임피던스 조절변수의 값을 상대적으로 낮추어 임피던스를 크게 하는 대신에 제어성능을 높이는 것이 바람직하다.

[0252]

그런데, 상기 장치는 작업자와 상호작용에 의해 구동하게 되므로 경우에 따라서 뜻하지 않게 작업자에게 충격 등을 가하는 비상상황이 발생할 수 있다. 이 경우, 작업자의 안전을 확보하기 위하여 매우 짧은 시간 내에 상기

장치를 안전한 상태로 돌리는 것이 필요하게 된다. 이 경우, 상기 장치를 돌리기 위하여 사용자가 가하는 힘은 소정의 외란에 해당하게 되며, 상기 가해진 외란에 의해 상기 시스템이 반응하기 위해서는 외란에 민감하도록 조절되어야 한다. 따라서, 이 경우에는 상기 임피던스 조절변수터의 값을 상대적으로 높이어 임피던스를 줄이는 대신에 제어성능을 낮추고 외란에 대한 민감도를 높이게 된다. 한편, 상기와 같은 비상상황의 경우에 작업자의 안전을 확보하기 위하여 상기 장치에 상기 임피던스 조절변수를 조절할 수 있는 조절수단, 예를 들어 비상스위치 등을 구비할 수 있다. 상기 비상스위치를 조작하는 경우에 상기 장치의 임피던스 조절변수의 값이 현저히 증가하도록 구비될 수 있을 것이다.

[0253] 전술한 실시예들에 따른 제어방법을 재활장치, 의료 장치 또는 3축 로봇과 같은 사람과 상호작용에 의해 구동하는 소위 메카트로닉 시스템에 적용하는 경우에 상기 메카트로닉 시스템은 구동부와, 상기 구동부의 구동에 의해 소정의 동작을 수행하는 동작부와, 상기 시스템의 수학적 모델링에 따라 임피던스를 조절하는 조절수단과, 상기 구동부와 동작부를 제어하며, 상기 임피던스 조절수단의 조작에 의해 상기 구동부에 제공되는 구동전압 또는 구동전류 등을 변화시키는 제어부를 구비할 수 있다.

[0254] 여기서, 상기 구동부는 시스템의 모터 등으로 이루어질 수 있으며, 상기 동작부는 상기 구동부의 구동에 의해 움직이게 되는 구조로 구성되며, 예를 들어 팔꿈치 보조 장치의 상부팔 버팀부 또는 하부팔 버팀부 등이 동작부에 해당한다.

[0255] 한편, 상기 제어부는 상기 시스템의 고유특성에 따라 상기 시스템을 안정화시키며 단일 파라미터인 임피던스 조절변수(q)에 의해 상기 시스템의 임피던스를 조절하도록 설계된 제어기($C(s)$)를 저장할 수 있으며, 상기 임피던스 조절수단은 상기 임피던스 조절변수(q)를 조절하도록 구성될 수 있다. 이러한 조절수단은 예를 들어 조그서틀 또는 비상스위치 등과 같이 다양한 방법으로 구현될 수 있다.

[0256] 결국, 상기 제어부는 상기 임피던스 조절수단의 조작에 의해 상기 임피던스 조절변수(q)가 변화하는 경우에 상기 제어기($C(s)$)에 따라 상기 구동부에 제공되는 구동전압을 변화시키게 되며, 상기 구동전압의 변화에 따라 임피던스를 조절하게 된다. 상기 제어기의 구체적인 설계방법은 이미 상술하였으므로 반복적인 설명은 생략한다.

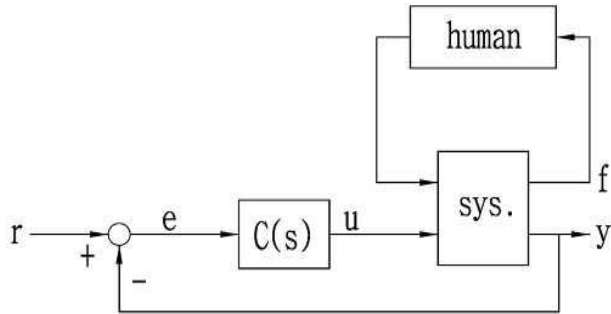
[0257] 본 명세서는 본 발명의 바람직한 실시예를 참조하여 설명하였지만, 해당 기술분야의 당업자는 이하에서 서술하는 특허청구범위에 기재된 본 발명의 사상 및 영역으로부터 벗어나지 않는 범위 내에서 본 발명을 다양하게 수정 및 변경 실시할 수 있을 것이다. 그러므로 변형된 실시가 기본적으로 본 발명의 특허청구범위의 구성요소를 포함한다면 모두 본 발명의 기술적 범주에 포함된다고 보아야 한다.

부호의 설명

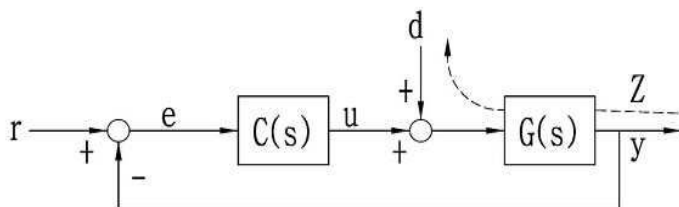
- [0258]
- 10...팔꿈치 보조장치
 - 12...상부팔 버팀부
 - 14...하부팔 버팀부
 - 16...AC 기어모터
 - 20...3축 로봇
 - 22...제1 압
 - 24...제2 압
 - 26...제3 압
 - 30...로드셀

도면

도면1

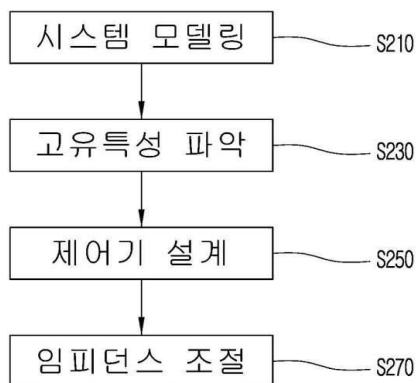


(a)

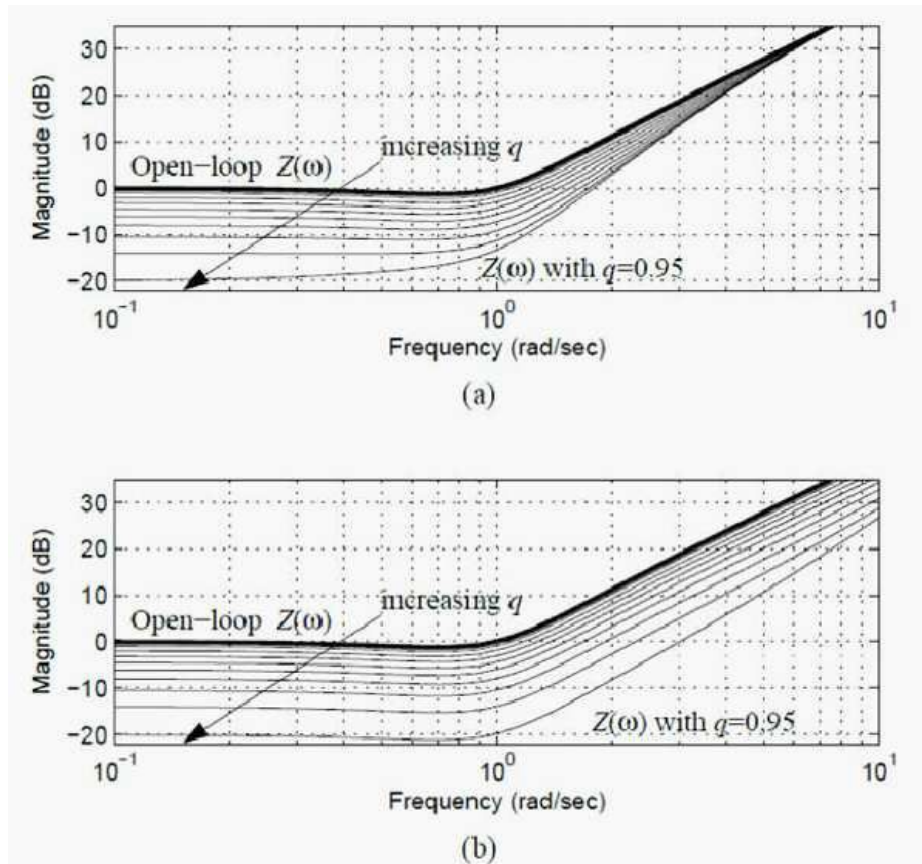


(b)

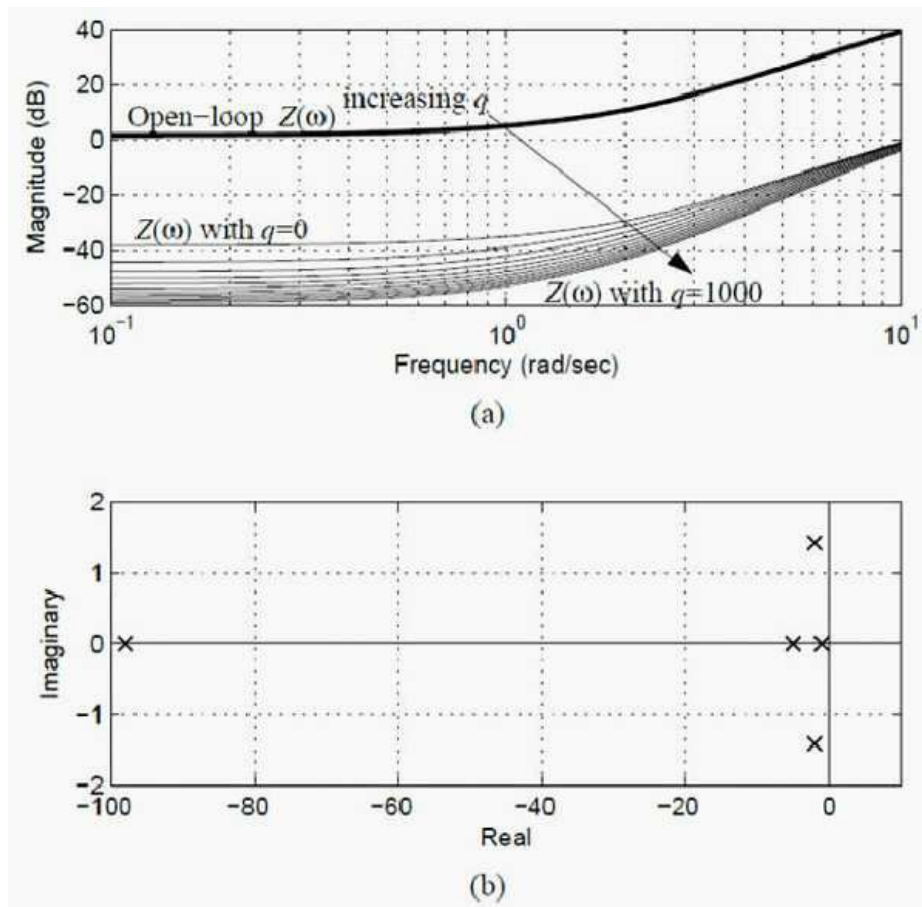
도면2



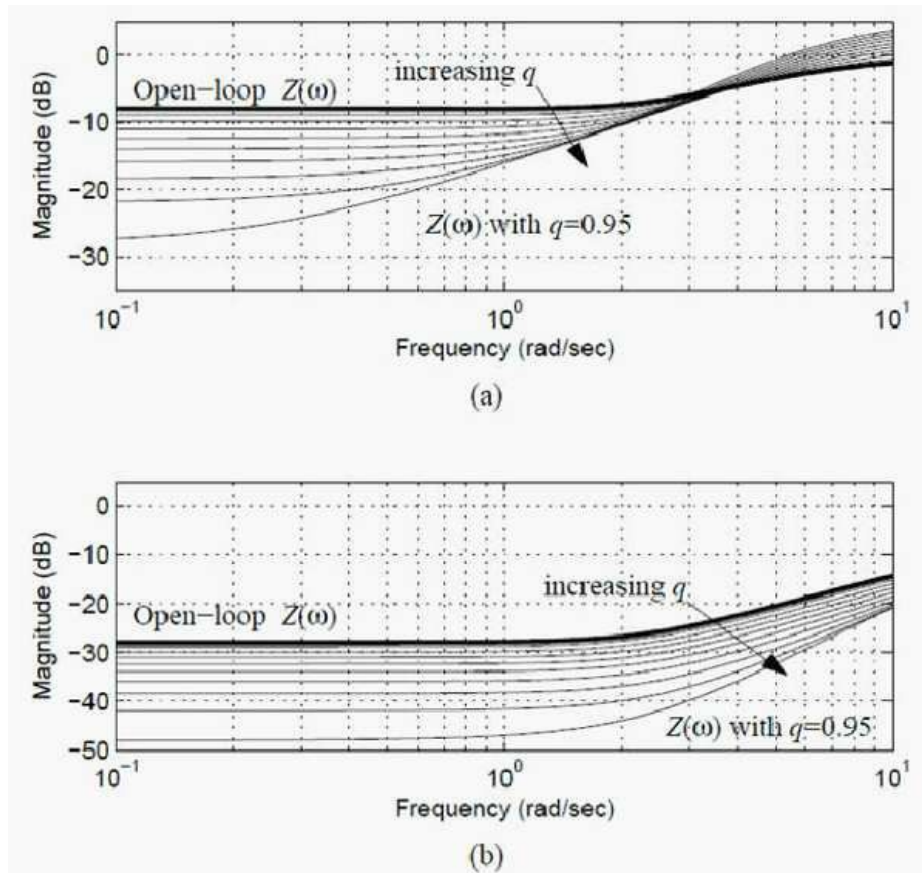
도면3



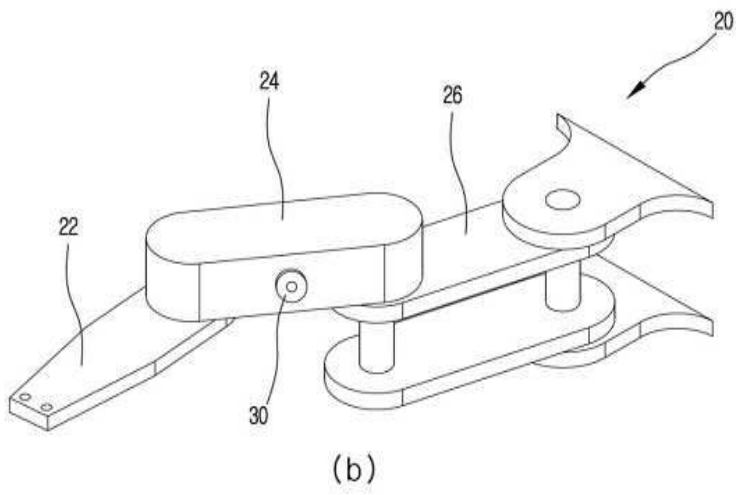
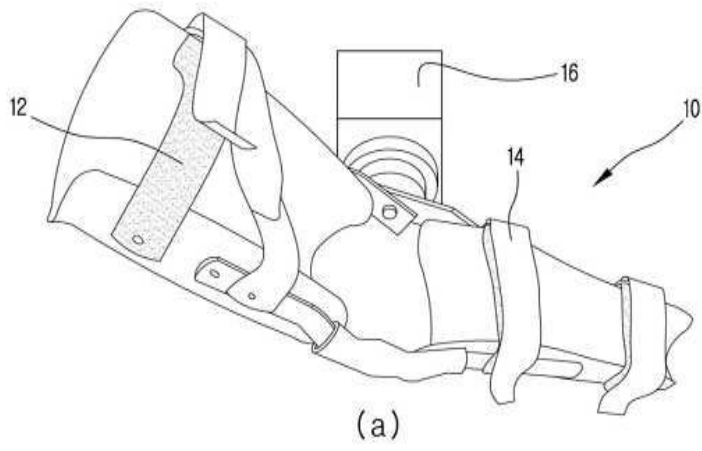
도면4



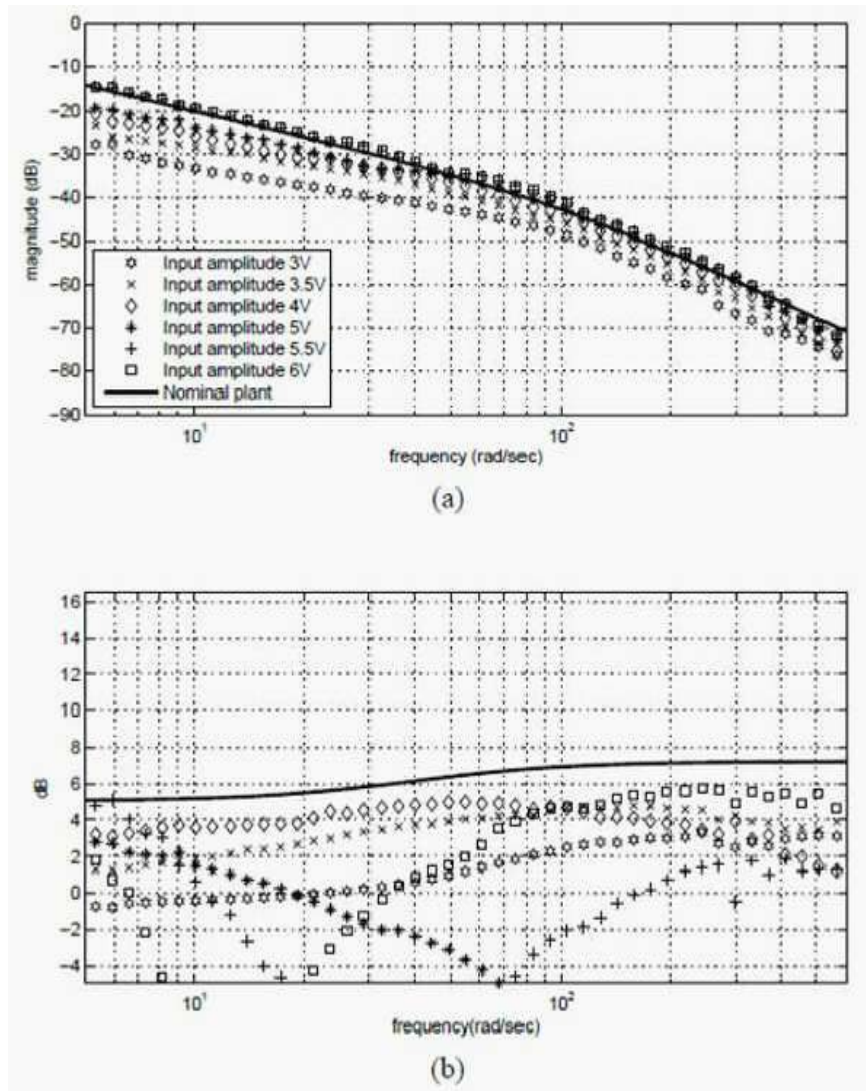
도면5



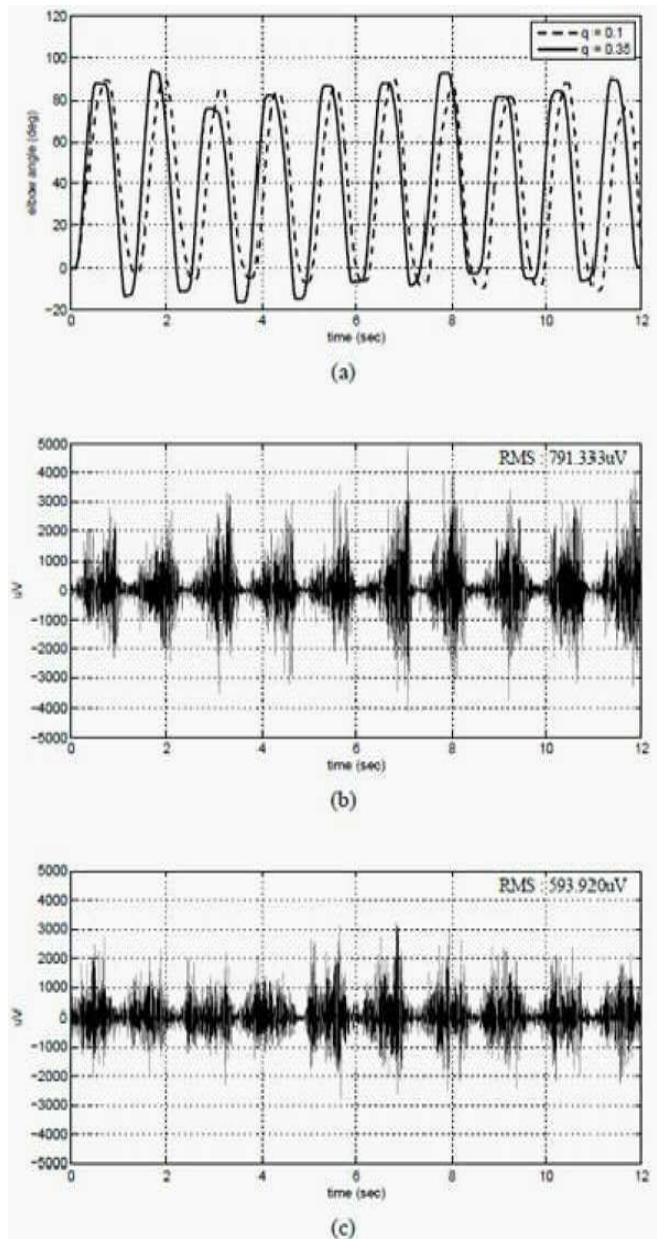
도면6



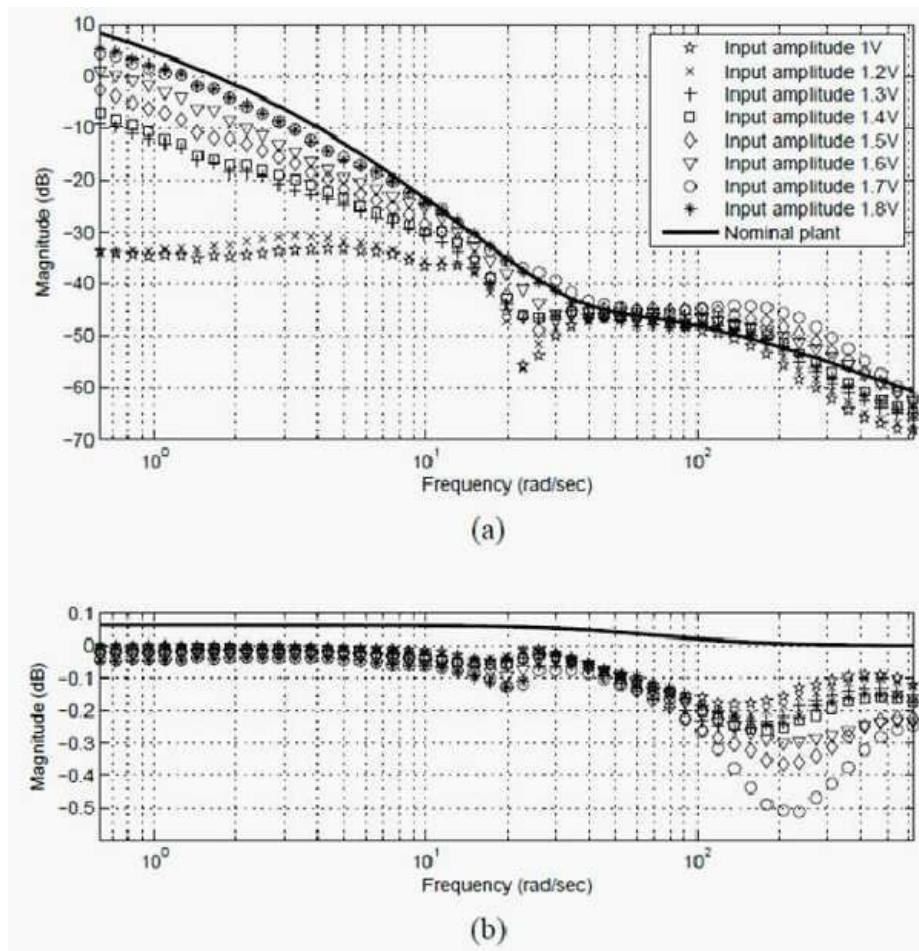
도면7



도면8



도면9



도면10

