(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2015-0134765
(43) 공개일자 2015년12월02일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
B25J 9/16 (2006.01) *B25J 13/00* (2006.01)
(21) 출원번호 10-2014-0061981
(22) 출원일자 2014년05월23일
심사청구일자 2014년05월23일

(71) 출원인
서강대학교산학협력단
서울특별시 마포구 백범로 35 (신수동, 서강대학교)
(72) 발명자
오세훈
경기도 고양시 덕양구 지도로124번길 14-5 대영빌 305호 (토당동)
공경철
서울특별시 관악구 봉천로 387, 102동 1304호 (봉천동, 두산아파트)
(74) 대리인
김준현, 서현, 이재홍, 민복기

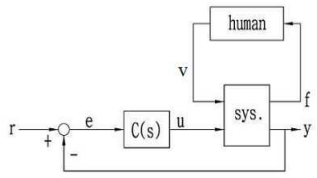
전체 청구항 수 : 총 15 항

(54) 발명의 명칭 **선택적 임피던스 조절 가능한 메카트로닉 시스템 및 그 제어방법**

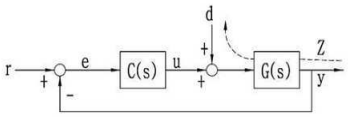
(57) 요 약

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

대 표 도 - 도1



(a)



(b)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업
과제고유번호 1345209074
부처명 교육부
연구관리전문기관 한국연구재단
연구사업명 일반연구자지원(교육부)
연구과제명 극한지탐사 로봇 시스템을 위한 자연 동역학 기반의 초고효율 이동 메커니즘 연구
기 여 율 1/1
주관기관 서강대학교 산학협력단
연구기간 2013.11.01 ~ 2014.10.31

명 세 서

청구범위

청구항 1

메카트로닉 시스템의 제어방법에 있어서,

상기 시스템에 가해지는 외력의 크기를 판단하는 단계; 및

상기 외력의 주파수에 따라 상기 시스템의 임피던스를 조절하는 단계;를 포함하는 것을 특징으로 하는 메카트로닉 시스템의 제어방법.

청구항 2

제1항에 있어서,

상기 임피던스를 조절하는 단계는

상기 시스템의 임피던스가 상대적으로 낮아지도록 하는 어시스트 주파수영역에 대해 필터링이 가능한 필터링함수를 설정하여 상기 임피던스를 조절하는 것을 특징으로 하는 메카트로닉 시스템의 제어방법.

청구항 3

제2항에 있어서,

상기 필터링함수는

$$Q_{\mathrm{imp}}(s) = \frac{-\tau_u s + 1}{\tau_l s + 1} \frac{1}{\tau_q s + 1}$$

을 만족하며, T_u, T_l, T_q는 시정수(時定數)로 이루어진 것을 특징으로 하는 메카트로닉 시스템의 제어방법.

청구항 4

제3항에 있어서,

상기 임피던스를 조절하는 단계는

상기 외력이 상기 어시스트 주파수영역에 해당하는 경우에 상기 시스템의 임피던스가 상대적으로 낮아지도록 하며, 상기 외력이 상기 어시스트 주파수영역 이외의 억제 주파수영역에 해당하는 경우에는 상기 시스템의 임피던스가 상대적으로 높아지도록 조절하는 것을 특징으로 하는 메카트로닉 시스템의 제어방법.

청구항 5

제4항에 있어서,

상기 외력의 주파수에 따라 상기 시스템의 임피던스를 조절하는 단계는

상기 어시스트 주파수영역에서 상기 외력의 위상이 180도 변하도록 필터링하는 단계;

상기 필터링된 외력에 의해 상기 어시스트 주파수영역에 대해서는 상대적으로 낮은 임피던스값을 가지도록 하며, 상기 억제 주파수영역에 대해서는 상대적으로 높은 임피던스값을 가지도록 하는 제어입력을 생성하는 단계;를 포함하는 것을 특징으로 하는 메카트로닉 시스템의 제어방법.

청구항 6

제1항에 있어서,

상기 시스템에 가해지는 외력의 크기를 판단하는 단계는

상기 시스템의 속도, 위치 및 각도 중에 적어도 하나를 측정하는 것을 특징으로 하는 메카트로닉 시스템의 제어 방법.

청구항 7

임피던스가 선택적으로 조절가능한 메카트로닉 시스템에 있어서,

구동부;

상기 구동부의 구동에 의해 소정의 동작을 수행하는 동작부;

상기 구동부와 동작부를 제어하며, 상기 시스템에 가해지는 외력의 주파수에 따라 상기 시스템의 임피던스를 조절하도록 설계된 필터링 함수를 포함하는 제어기를 구비하여 상기 구동부에 제공되는 구동전압 또는 구동전류를 제어하는 제어부;를 구비하는 것을 특징으로 하는 메카트로닉 시스템.

청구항 8

제7항에 있어서,

상기 시스템에는

상기 필텅링 함수는 상기 시스템의 임피던스가 상대적으로 낮아지도록 하는 어시스트 주파수영역에 대해 필터링이 가능한 것을 특징으로 하는 메카트로닉 시스템.

청구항 9

제8항에 있어서,

상기 필터링함수는

$$Q_{\mathrm{imp}}(s) = \frac{-\tau_u s + 1}{\tau_l s + 1} \frac{1}{\tau_q s + 1}$$

을 만족하며, T_u, T_l, T_q는 시정수(時定數)로 이루어진 것을 특징으로 하는 메카트로닉 시스템.

청구항 10

제7항에 있어서,

상기 시스템에 가해지는 외력의 속도, 위치 및 각도 중에 적어도 하나를 측정하는 센서를 구비하는 것을 특징으로 하는 메카트로닉 시스템.

청구항 11

제7항에 있어서,

상기 제어부는 상기 외력이 상기 주파수영역에 해당하는 경우에 상기 시스템의 임피던스가 상대적으로 낮아지도록 하며, 상기 외력이 상기 어시스트 주파수영역 이외의 억제 주파수영역에 해당하는 경우에는 상기 시스템의 임피던스가 상대적으로 높아지도록, 상기 제어기에 따라 상기 구동부에 제공되는 구동전압 또는 구동전류를 변화시키는 것을 특징으로 하는 메카트로닉 시스템.

청구항 12

제11항에 있어서,

상기 외력의 주파수에 따라 상기 시스템의 임피던스를 조절하는 필터링 함수는

상기 어시스트 주파수영역에서 상기 외력의 위상이 180도 변하도록 필터링하고, 상기 필터링된 외력에 의해 상기 어시스트 주파수영역에 대해서는 상대적으로 낮은 임피던스값을 가지도록 하며, 상기 억제 주파수영역에 대

해서는 상대적으로 높은 임피던스값을 가지도록 하는 제어입력을 생성하는 것을 특징으로 하는 메카트로닉 시스템.

청구항 13

제12항에 있어서,

상기 제어기는 피드백 제어기와 피드포워드 제어기 중에 적어도 하나를 구비하는 것을 특징으로 하는 메카트로닉 시스템.

청구항 14

제7항에 있어서,

상기 시스템은 하기 식을 만족시키는 경우에 안정화되며,

$$\| T_{r.tdof}(s)\Delta(s) \| < 0$$

상기 △(S)는 모델링한 시스템의 동적특성 Pn(s)과 실제 시스템의 동적특성 P(s)사이의 오차에 해당하고, 상기 $T_{r.tdof}(S)$는 하기 식으로 표현되며,

$$T_{r.tdof} = \frac{CP_n + Q}{1 + CP_n}$$

C는 되먹임(피드백)제어기를, Pn은 상기 모델링된 시스템의 수학적인 모델을, Q는 설명할 측정된 외란에 적용하는 필터함수를 의미하는 것을 특징으로 하는 메카트로닉 시스템.

청구항 15

제7항에 있어서,

상기 제어기는 상기 시스템이 소정의 작업을 위하여 주어지는 명령에 대하여 상기 시스템의 움직임이 상기 명령을 추종하여 상기 시스템이 안정화되도록 설계된 것을 특징으로 하는 메카트로닉 시스템.

발명의 설명

기 술 분 야

[0001] 본 발명은 임피던스를 선택적으로 조절할 수 있는 메카트로닉 시스템 및 메카트로닉 시스템의 기계적 임피던스를 선택적으로 조절하는 제어방법에 대한 것으로서, 보다 상세하게는 어떠한 시스템에 외력이 작용하는 경우에 상기 외력이 소정의 주파수 영역에 해당하는 경우에는 상기 시스템의 임피던스를 상대적으로 낮추어 주고, 반대로 상기 외력이 상기 주파수 영역에 해당하지 않는 경우에는 상기 시스템의 임피던스를 상대적으로 높여 안전성 및 제어 성능을 향상시킬 수 있는 메카트로닉 시스템 및 그 제어방법에 관한 것이다.

배 경 기 술

[0002] 일반적으로 어떠한 시스템을 제어하는데 있어 필수적인 요소는 제어 성능과 안정성(Stability)을 들 수 있으며, 최근 발달하고 있는 사용자와 물리적으로 상호작용하는 메카트로닉(mechatronic) 시스템에서는 상기 요소 중 '안전성(safety)'이 중요한 인자로 작용한다. 이러한 메카트로닉 시스템은 사용자와 상호작용하므로, 사용자를 보호하기 위한 '안전성'이라는 요소가 필수적이다.

[0003] 여기서, 메카트로닉 시스템의 '안전성'이라는 개념은 사용자가 메카트로닉 시스템에 사용자 등이 소정의 동작을 가하는 경우에 사용자에 의하여 가해진 동작에 대한 반발력의 측면에서 판단될 수 있다. 즉, 사용자가 메카트로닉 시스템에 동작을 가하는 경우에 가해진 동작에 대한 반발력이 상대적으로 작은 경우에 안전하다고 판단할 수 있다.

[0004] 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 작다고 할 수 있다.

[0005] 기존의 산업용 로봇과 같이 사람이 관여하지 않는 환경에서 소정의 작업을 반복수행하는 메카트로닉 시스템의 경우, 환경의 변화에 영향을 받지 않고 소정의 작업을 수행하기 위하여 높은 임피던스를 지니도록 설계되어 있다. 이러한 경우 사람과의 상호작용이 발생할 경우 큰 반발력이 생성되어 안전성을 확보할 수 없게 된다.

[0006] 또한, 사람과 물리적으로 상호작용하는 메카트로닉 시스템의 경우, 사용자가 시스템에 가하는 움직임에 대해서 시스템이 사용자에게 발생시키는 반발력, 즉 임피던스가 선택적으로 조절되는 것이 바람직하다. 그러한 대표적인 시스템으로 미국 Rethink robotics의 Baxter와 같은 인간 친화형 산업용 로봇 및 스위스 Hocoma에서 판매 중인 재활 로봇 Lokomat 등이 있다.

[0007] 사용자가 동일한 작업 공간 내에서 산업용 로봇과 접촉하며 공동 작업을 하는 경우 등에는 사용자와 산업용 로봇의 의도치 않은 접촉 또는 충돌이 있을 수 있다. 이러한 사람과 로봇의 상호작용이 존재할 경우 사용자의 안전을 위하여 로봇의 기계적인 임피던스가 조절되어야 한다.

[0008] 그러나, 상기 산업용 로봇에 작용하는 모든 외력에 대해 임피던스가 작다고 하면 작업자 등과 로봇이 충돌하는 경우에는 작업자 등의 안전성을 높일 수 있지만, 작업자 등과의 상호작용이 없을 경우 로봇이 자동적으로 수행해야하는 작업들을 수행할 수 없게 된다. 즉, 작은 임피던스를 가진 로봇은 무거운 물건을 들어 올리는 것과 같은 산업용 로봇에 기본적으로 요구되는 작업을 수행할 수 없게 된다. 반대로, 상기 산업용 로봇에 작용하는 모든 외력에 대해 임피던스가 높다고 하면 환경의 영향을 받지 않고 소정의 작업을 수행할 수 있지만, 작업자 등과 로봇이 충돌하는 경우에 작업자 등의 안전성을 확보하기 힘들 것이다.

[0009] 특히, 메카트로닉 시스템이 재활 로봇인 경우, 환자가 스스로 생성할 수 있는 근력의 크기와 방향에 따라 적절하게 로봇의 임피던스를 조절하여서 적절한 부하를 필요한 근육에 가하여 주어서 재활효과를 높일 수 있다.

[0010] 이와 같이, 인간과 상호작용을 하는 메카트로닉 시스템의 경우에는 어떠한 외력이 작용하는 경우에 모든 외력에 대해서 임피던스가 낮아지도록 또는 임피던스가 높아지도록 일괄적으로 시스템을 구성하기 보다는 상기 시스템에 작용되는 외력의 주파수성분에 따라 시스템의 안전성 또는 제어 성능을 보장하기 위하여 상기 임피던스를 선택적으로 조절할 필요성이 있다.

발명의 내용

해결하려는 과제

[0011] 본 발명은 상기와 같은 문제점을 해결하기 위하여 메카트로닉 시스템에 소정의 외력이 작용하는 경우에 상기 외력의 주파수 성분을 분석하여, 외력의 주파수 성분에 따라 상기 시스템의 임피던스를 조절할 수 있는 메카트로닉 시스템 및 그 제어방법을 제공하는 것을 해결하고자 하는 과제로 한다.

[0012] 또한, 본 발명은 이러한 조절 가능한 선택적인 임피던스 구현을 위하여 상기 외력의 크기를 판단하는 경우, 시스템에 인가되는 힘을 측정하기 위하여 힘센서가 아닌 기존 메카트로닉 시스템의 서보 제어에 사용되는 위치측정기 또는 각도측정기를 적용하는 것을 해결하고자 하는 과제로 한다. 구체적으로, 고가의 힘센서를 적용하여 발생할 수 있는 원가의 증가 및 시스템의 기계설계 변경 없이 기존 시스템의 소프트웨어 부분만을 수정하여 선택적 임피던스를 구현할 수 있는 메카트로닉 시스템 및 그 제어방법을 제공하는 것을 해결하고자 하는 과제로 한다.

[0013] 또한, 본 발명은 상기 메카트로닉 시스템에 소정의 외력이 작용하는 경우에 상기 외력의 크기를 판단하여 상기 외력의 주파수가 미리 정해진 소정의 주파수 영역에 해당하는 경우에는 상기 시스템의 임피던스를 상대적으로 낮추고, 반대로 상기 시스템의 주파수가 상기 미리 정해진 주파수 영역에 해당하지 않는 경우에는 상기 시스템의 임피던스를 상대적으로 높일 수 있는 메카트로닉 시스템 및 그 제어방법을 제공하는 것을 해결하고자 하는 과제로 한다.

[0014] 또한, 본 발명은 상기 메카트로닉 시스템에서 미리 정해진 소정의 주파수 영역에 해당하여 상기 시스템의 임피던스를 상대적으로 낮추는 경우에 상기 메카트로닉 시스템의 명령 추종 성능이 낮아지는 것을 방지할 수 있는 메카트로닉 시스템 및 그 제어방법을 제공하는 것을 과제로 한다.

[0015] 나아가, 본 발명은 외력의 측정을 위하여 시스템의 동적모델을 이용하고 있으나 실제 시스템의 특성과 모델링한 동적모델 사이에 오차가 존재할 경우 시스템이 불안정하여 질 수 있다. 따라서, 전술한 바와 같이 선택적으로 임피던스를 조절하는 경우에 상기 전체 시스템을 안정화시키는 것이 필요하며, 본 발명에서는 동적모델의 오차와 그 오차를 고려한 시스템의 안정조건을 명확하게 하여 시스템을 안정화시킬 수 있는 메카트로닉 시스템 및 그 제어방법을 제공하는 것을 과제로 한다.

과제의 해결 수단

[0016] 상기 과제를 해결하기 위하여, 본 발명은 메카트로닉 시스템의 기계적 임피던스를 선택적으로 조절하는 제어방법에 있어서, 상기 시스템에 가해지는 외력의 크기를 판단하는 단계, 상기 외력의 주파수에 따라 상기 시스템의 임피던스를 조절하는 단계를 포함하는 메카트로닉 시스템의 제어방법을 제공할 수 있다.

[0017] 이 경우, 상기 임피던스를 조절하는 단계는 상기 시스템의 임피던스가 상대적으로 낮아지도록 하는 어시스트 주파수영역에 대해 필터링이 가능한 필터링함수를 설정하여 상기 임피던스를 조절할 수 있다.

[0018] 이 경우, 상기 필터링함수는

$$Q_{\mathrm{imp}}(s) = \frac{-\tau_u s + 1}{\tau_l s + 1} \frac{1}{\tau_q s + 1}$$

[0019]

[0020] 을 만족하며, T_u, T_l, T_q는 시정수(時定數)로 이루어질 수 있다.

[0021] 여기서, 상기 임피던스를 조절하는 단계는 상기 외력이 상기 어시스트 주파수영역에 해당하는 경우에 상기 시스템의 임피던스가 상대적으로 낮아지도록 하며, 상기 외력이 상기 어시스트 주파수영역 이외의 억제 주파수영역에 해당하는 경우에는 상기 시스템의 임피던스가 상대적으로 높아지도록 조절할 수 있다.

[0022] 또한, 상기 외력의 주파수에 따라 상기 시스템의 임피던스를 조절하는 단계는 상기 어시스트 주파수영역에서 상기 외력의 위상이 180도 변하도록 필터링하는 단계, 상기 필터링된 외력에 의해 상기 어시스트 주파수영역에 대해서는 상대적으로 낮은 임피던스값을 가지도록 하며, 상기 억제 주파수영역에 대해서는 상대적으로 높은 임피던스값을 가지도록 하는 제어입력을 생성하는 단계를 포함할 수 있다.

[0023] 여기서, 상기 시스템에 가해지는 외력의 크기를 판단하는 단계는 상기 시스템의 속도, 위치 및 각도 중에 적어도 하나를 측정할 수 있다.

[0024] 그리고, 상기 제어기는 피드백 제어기와 피드포워드 제어기 중에 적어도 하나를 구비할 수 있다.

[0025] 여기서, 상기 시스템은 하기 식을 만족시키는 경우에 안정화되며,

$$\| T_{r.tdof}(s)\Delta(s) \| < 0$$

[0026]

[0027] 상기 △(S)는 모델링한 시스템의 동적특성 Pn(s)과 실제 시스템의 동적특성 P(s)사이의 오차에 해당하고, 상기 $T_{r.tdof}(S)$는 하기 식으로 표현되며,

$$T_{r.tdof} = \frac{CP_n + Q}{1 + CP_n}$$

[0028]

[0029] C는 되먹임(피드백)제어기를, Pn은 상기 모델링된 시스템의 수학적인 모델을, Q는 설명할 측정된 외란에 적용하는 필터함수를 의미할 수 있다.

[0030] 그리고, 본 발명은 상기 과제를 해결하기 위하여, 임피던스가 선택적으로 조절가능한 메카트로닉 시스템에 있어서,구동부, 상기 구동부의 구동에 의해 소정의 동작을 수행하는 동작부, 상기 구동부와 동작부를 제어하며, 상기 시스템에 가해지는 외력의 주파수에 따라 상기 시스템의 임피던스를 조절하도록 설계된 필터링 함수를 포함하는 제어기를 구비하여 상기 구동부에 제공되는 구동전압 또는 구동전류를 제어하는 제어부를 구비하는 메카트

로닉 시스템을 제공할 수 있다.

[0031] 또한, 상기 시스템에는 상기 필텅링 함수는 상기 시스템의 임피던스가 상대적으로 낮아지도록 하는 어시스트 주파수영역에 대해 필터링이 가능할 수 있다.

[0032] 그리고, 상기 필터링함수는

$$Q_{\mathrm{imp}}(s) = \frac{-\tau_u s + 1}{\tau_l s + 1} \frac{1}{\tau_q s + 1}$$

[0033]

[0034] 을 만족하며, T_u, T_l, T_q는 시정수(時定數)로 이루어질 수 있다.

[0035] 또한, 상기 시스템에 가해지는 외력의 속도, 위치 및 각도 중에 적어도 하나를 측정하는 센서를 구비할 수 있다.

[0036] 그리고, 상기 제어부는 상기 외력이 상기 주파수영역에 해당하는 경우에 상기 시스템의 임피던스가 상대적으로 낮아지도록 하며, 상기 외력이 상기 어시스트 주파수영역 이외의 억제 주파수영역에 해당하는 경우에는 상기 시스템의 임피던스가 상대적으로 높아지도록, 상기 제어기에 따라 상기 구동부에 제공되는 구동전압 또는 구동전류를 변화시킬 수 있다.

[0037] 그리고, 상기 외력의 주파수에 따라 상기 시스템의 임피던스를 조절하는 필터링 함수는 상기 어시스트 주파수영역에서 상기 외력의 위상이 180도 변하도록 필터링하고, 상기 필터링된 외력에 의해 상기 어시스트 주파수영역에 대해서는 상대적으로 낮은 임피던스값을 가지도록 하며, 상기 억제 주파수영역에 대해서는 상대적으로 높은 임피던스값을 가지도록 하는 제어입력을 생성할 수 있다.

[0038] 또한, 상기 제어기는 피드백 제어기와 피드포워드 제어기 중에 적어도 하나를 구비할 수 있다.

[0039] 그리고, 상기 시스템은 하기 식을 만족시키는 경우에 안정화되며,

$$\| T_{r.tdof}(s)\Delta(s) \| < 0$$

[0040]

[0041] 상기 △(S)는 모델링한 시스템의 동적특성 Pn(s)과 실제 시스템의 동적특성 P(s)사이의 오차에 해당하고, 상기 $T_{r.tdof}(S)$는 하기 식으로 표현되며,

$$T_{r.tdof} = \frac{CP_n + Q}{1 + CP_n}$$

[0042]

[0043] C는 되먹임(피드백)제어기를, Pn은 상기 모델링된 시스템의 수학적인 모델을, Q는 설명할 측정된 외란에 적용하는 필터함수를 의미할 수 있다.

[0044] 이 경우, 상기 제어기는 상기 시스템이 소정의 작업을 위하여 주어지는 명령에 대하여 상기 시스템의 움직임이 상기 명령을 추종하여 상기 시스템이 안정화되도록 설계될 수 있다.

발명의 효과

[0045] 본 발명에 따르면, 사용자와 상호작용하는 소정의 메카트로닉 시스템에 있어서 소정의 외력이 작용하는 경우에 상기 외력의 주파수 성분에 따라 임피던스를 선택적으로 조절하여 메카트로닉 시스템의 안전성과 제어 성능을 함께 향상시킬 수 있다.

[0046] 또한, 본 발명에 따르면, 메카트로닉 시스템에 외력이 작용하는 경우, 외력의 주파수가 미리 정해진 소정의 어시스트 주파수영역에 해당하는 경우에는 상기 시스템의 임피던스를 상대적으로 낮추고, 상기 외력의 주파수가 상기 어시스트 주파수영역에 해당하지 않는 경우에는 상기 시스템의 임피던스를 상대적으로 높일 수 있다.

[0047] 예를 들어, 사람에 의해 작용하는 외력의 주파수 범위를 상기 어시스트 주파수영역으로 미리 설정한 경우, 상기

메카트로닉 시스템의 구동 중에 사람에 의한 외력이 작용하는 경우에는 상기 시스템의 임피던스가 낮아져서 사람에 대한 안전성을 높일 수 있다. 반면에 상기 시스템의 구동 중에 사람 이외의 의도치 않은 외력이 작용하는 경우에는 상기 미리 정해진 어시스트 주파수영역에 해당하지 않으므로 상기 시스템의 임피던스를 높여 상기 시스템의 오작동 없이 소정의 작업을 수행하게 되므로 능률을 향상시킬 수 있다.

[0048] 또한, 본 발명에 따르면, 시스템의 기계적인 임피던스를 선택적으로 조절하고 동시에 시스템의 안정성(stability)을 보장할 수 있게 된다.

도면의 간단한 설명

[0049] 도 1은 사용자와 상호작용하는 메카트로닉 시스템의 기본적인 블록선도이다.

도 2는 본 발명에 따른 제어방법을 도시한 순서도이다.

도 3은 본 발명의 일 실시예에 따른 메카트로닉 시스템의 기본적인 블록선도를 도시한 도면이다.

도 4는 본 발명의 다른 실시예에 따른 메카트로닉 시스템의 기본적인 블록선도를 도시한 도면이다.

도 5의 메카트로닉 시스템의 예로서의 산업용 로봇을 도시한다.

도 6은 도 5에 도시된 산업용 로봇에 본 발명을 적용하여 실험한 결과를 도시한다.

도 7은 도 5에 도시된 산업용 로봇의 충격실험의 예를 도시한다.

도 8은 도 5에 도시된 산업용 로봇의 충격실험의 결과를 도시한다.

도 9는 본 발명의 제어기에 피드포워드 제어기를 구비함으로써 로봇팔의 명령 추종 특성의 실험결과를 도시한다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0050] 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.

[0051] 이하, 본 명세서에서 사용되는 '기계적인 임피던스(이하, '임피던스'라 함)'는 후술하는 메카트로닉 시스템에서 사용자의 동작에 대해 메카트로닉 시스템이 발생시키는 저항력(resistive forces)의 크기로 정의한다.

[0052] 그런데, 상기 임피던스에 의한 시스템의 안전성 판단은 안정한(stable) 시스템에서만 유효하다. 불안정한 시스템은 외란에 보다 민감하게 반응하게 되며, 외란에 의해 유도된 초기 속도 방향으로 계속하여 움직이며 저항력을 발생시키지 않기 때문이다. 따라서, 소정의 시스템의 임피던스를 조절하기 위해서는 상기 시스템을 안정화시키는 과정도 필요하게 된다.

[0053] 대부분의 메카트로닉 시스템은 피드백 제어에 의해 운영되며, 따라서 폐루프 시스템의 기계적인 임피던스가 개루프 시스템의 임피던스에 비해 상대적으로 더 중요하게 된다. 도 1(a)는 기본적인 단일입력 및 단일출력의 피드백 제어(feedback-controlled) 시스템의 블록 다이어그램이며, 도 1(b)는 상기 도 1(a)를 단순화한 도면이다.

[0054] 도 1을 참조하면, 기본적으로 시스템은 제어대상인 플랜트(plant, G(s))와 제어기(controller, C(s))를 구비한다. 예를 들어, '산업용 로봇' 등이 제어대상(플랜트)에 해당하며, 제어기(C(s))는 제어 알고리즘에 따라 신호를 내보내는 장치로 정의될 수 있다. 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.

[0055] 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 구속될 수 있다. 예를 들어, Hocoma에서 판매 중인 Lokomat이나 CYBERDYNE사에서 판매 대여하고 있는 HAL과 같은 재활용 로봇의 경우 인체의 운동을 돕기 위한 기계와 사용자의 몸이 붙어서 같은 속도로 움직이는 경우를 상정할 수 있다.

[0056] 이러한 경우, 힘의 작용 반작용의 법칙에 따라 시스템에 생성되는 저항력과 외부에서 시스템에 가해지는 외란사이에는 크기는 같으나 방향이 반대라는 관계가 성립한다.

[0057] 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 작업자 또는 사용자 등의 접촉시 발생되는 외력에 의한 입력, 즉 속도 입력(v)에 의해 메카트로닉 시스템에 의하여 유도되는 임피던스에 해당되는 저항력(f)은 외부에서 시스템에 가하는 가상의 외란(d)로 가정될 수 있다.

[0058] 속도 입력(v)와 시스템 출력(y)간의 구속 및 유도되는 저항력(f)과 외란(d) 사이의 관계를 고려하면 시스템에 가해지는 속도입력과 그에 의하여 유도되는 저항력간의 관계인 임피던스는 도 1(b)에서 시스템 출력(y)에서 가상의 외란(d)까지의 전달함수가 되며, 하기 수학식 1로 정의된다.

수학식 1

[0059] $$Z(\omega)=|G_{y\to d}(j\omega)|$$

[0060] 하지만, 상기 $G_{y->d}(jw)$는 블록 다이어그램을 해석하는데 있어서 전형적인 방법이 아니며, $G_{d->y}(jw)$가 도 1(b)에서 외란(d)에 대한 시스템 출력(y)의 전형적인 전달함수에 해당한다. 따라서, 상기 $G_{y->d}(jw)$는 $G^{-1}_{d->y}(jw)$로 전환될 수 있으며, 결국, 기계적인 임피던스는 상기 시스템에 작용하는 외란에 대한 출력의 역전달함수로 표현될 수 있으며, 하기 수학식 2로 표현될 수 있다.

수학식 2

[0061] $$Z(\omega)=|G_{y\to d}(j\omega)|=\left|\frac{1+G(j\omega)C(j\omega)}{G(j\omega)}\right|$$

[0062] 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 제어기(피드백 제어기)의 형태를 가지며, 각 제어기 설계 방법은 상기 시스템의 기계적 임피던스를 선택적으로 감소시킴과 동시에 안정성을 보장하게 된다. 이후에 구체적으로 살펴본다.

[0063] 상기와 같은 시스템은 소정의 조건들을 내포하고 있는 바, 이하 살펴보도록 한다.

[0064] 먼저, 상기 시스템이 안정(stable)하다고 가정하면, 기계적 임피던스의 최대값은 무한대(∞)에 수렴하게 된다. 시스템이 안정한 경우에 G(∞)의 값은 0이므로, ω가 무한대(∞)로 갈수록 상기 기계적 임피던스의 값은 무한대(∞)에 수렴하게 된다.

[0065] 그리고, 상기 시스템이 안정(stable)하다고 가정하면, 기계적 임피던스의 최소값은 0 보다 큰 값을 가지게 된다. 시스템이 안정한 경우에 폐루프의 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.

[0066] 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.

[0067] 한편, 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 경우에는 고이득 제어가 임피던스를 높이는 역할을 함으로 상기 고이득 제어는 바람직하지 않거나, 사용자 보호의 안전성 측면에서는 불리할 수 있다. 즉, 메카트로닉 시스템에서는 제어성능이 높아질수록 임피던스도 또한 커지게 된다. 따라서 메카트

로닉 시스템의 경우에는 전술한 트레이드-오프를 고려하여 외력이 작용하는 경우에 선택적으로 임피던스를 줄일 수 있는 제어기의 설계가 필요하다고 할 수 있다. 만약 시스템이 불안정하다면, 시스템을 안정화시키는 것도 피드백 제거기의 역할에 포함될 것이다.

[0068] 도 2는 본 발명에 따른 제어방법을 도시한 순서도이다.

[0069] 도 2를 참조하면, 본 발명에 따른 제어방법은 메카트로닉 시스템의 제어방법에 있어서, 상기 모델링된 시스템에 가해지는 외력의 크기를 판단하는 단계(S230), 상기 외력의 주파수에 따라 시스템의 임피던스를 조절하는 단계(S250)를 포함할 수 있다.

[0070] 본 발명의 메카트로닉 시스템을 본 발명의 요구조건을 만족하도록 설계하기 위하여 시스템의 모델링(S210)이 필요하다.

[0071] 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.

[0072] 상기 시스템을 모델링 하는 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 설명은 생략한다.

[0073] 시스템의 설계자는 상기 외력의 주파수에 따라 상기 시스템의 임피던스를 조절하면서 시스템 출력이 기준입력에 추종하고 시스템이 안정한 상태가 되도록 제어기를 설계(S270)할 수 있다.

[0074] 도 3은 본 발명의 일 실시예에 따른 메카트로닉 시스템의 기본적인 블록선도를 도시한 도면이다.

[0075] 도 3을 참조하면, P(s)는 제어대상이 되는 플랜트를 의미하고, C(s)는 되먹임(피드백)제어기를, F(s)는 앞먹임(피드포워드)제어기를, Pn(s)는 상기 모델링된 시스템의 수학적인 모델을, Pn-1(s)은 모델링된 시스템의 수학적 모델의 역함수를, Q(s)는 이하 설명할 측정된 외란에 적용하는 필터함수를 의미한다.

[0076] 상기 시스템의 모델링을 완료한 후, 상기 시스템에 가해지는 외력의 크기를 판단하게 된다(S230).

[0077] 상기 외력은 어떠한 형태의 힘이라도 상관없으며, 바람직하게 사용자 등과 상호작용에 의해 구동하는 시스템의 경우에 사용자에 의해 작용하는 외력으로 정의될 수 있다. 이 경우, 상기 시스템에 가해지는 외력의 속도, 위치 및 각도 중에 적어도 하나를 측정할 수 있는 센서, 예를 들어 카메라 등에 의해 외력을 시각적으로 인식하고 이에 의해 속도, 위치 및 각도 중에 적어도 하나의 정보를 추출하는 센서장치를 구비할 수 있다.

[0078] 외력을 측정하기 위하여 종래에는 고가의 힘센서를 적용하였지만, 기존 시스템의 소프트웨어 부분만을 수정하여 선택적 임피던스를 구현할 수 있는 메카트로닉 시스템 및 그 제어방법을 제공하여 원가의 증가 및 시스템의 기계설계 변경을 방지할 수 있다.

[0079] 도 3은 이러한 여러 가지 외력측정 방법 가운데 기존 서보제어기에 사용되는 위치측정센서 또는 각도측정센서를 이용하여 외력의 크기를 판단하는 외란관측기('A' 영역)를 포함하고 있다. 외란관측기란 시스템의 수학적 모델, Pn(s)와 시스템의 입출력, u,y를 이용하여 시스템에 작용한 외란을 측정하는 알고리즘으로 하기 수학식 3으로 표현된다.

수학식 3

$$\hat{d} = P_n^{-1} y - u$$

[0080]

[0081] 도 3의 'A' 영역이 상기 외란관측기를 나타내고 있으며, 이러한 외란관측기를 통하여 측정된 외란을 필터 Q(s)를 통하여 적절하게 조절한 뒤 제어입력(u)에 반영함으로 시스템의 임피던스를 조절할 수 있다.

[0082] 상기한 바와 같이 외력의 크기를 판단한 뒤 그 외력에 적용하는 필터 Q(s)를 적절하게 설계하여 외력의 주파수

에 따라 시스템의 임피던스를 조절한다(S250).

[0083] 상기 측정된 외력에 적용하는 필터 Q(s)를, 임피던스가 낮아지는 특정 주파수영역(이하, '어시스트 주파수영역'이라 함)과 임피던스가 높아지는 특정 주파수영역을 구분하여 조절할 수 있는 필터로 설계함으로 선택적인 임피던스를 구현할 수 있다. 상기 필터링 함수는 서보제어기 안에서 알고리즘을 이용하여 디지털필터의 형태로 구현될 수 있다.

[0084] 여기서, 상기 필터링 함수는 하기 수학식 4를 만족하도록 구성될 수 있다.

수학식 4

$$Q_{\mathrm{imp}}(s) = \frac{-\tau_u s + 1}{\tau_l s + 1} \frac{1}{\tau_q s + 1}$$

[0085]

[0086] 상기의 필터링 함수는 T_u, T_l, T_q의 세 가지의 변수(이하, 시정수(時定數)라고 함)를 가지며 상기 시정수를 이용하여서 선택적인 임피던스가 구현되는 주파수 영역을 결정한다.

[0087] 이 시정수를 $T_u \geq T_l > T_q$의 크기를 가지도록 설정함으로써, 1) 주파수 $1/T_u$(rad/s) 이하, 2) $1/T_u$(rad/s) 이상 및 주파수 $1/T_q$(rad/s)이하, 3) 주파수 $1/T_q$(rad/s)이상의 세 가지 영역으로 주파수 영역을 구분, 각각의 주파수 영역이 개별적인 임피던스를 가지도록 한다. 이렇게 나누어진 주파수 영역중 1)의 $1/T_u$(rad/s) 이하의 주파수 영역과 3)의 $1/T_q$(rad/s)이상의 주파수 영역은 상기 측정된 외력에 대해 시스템의 임피던스가 높아지는 주파수 영역(이하, '억제 주파수영역'이라 함)에 해당하며, 2)의 영역에 해당하는 $1/T_u$(rad/s)와 $1/T_q$(rad/s)사이의 주파수 영역은 시스템의 임피던스가 상대적으로 낮아지는 '어시스트 주파수영역'에 해당한다.

[0088] 메카트로닉 시스템에 인가되는 외력이 사람에 의하여 가해지는 힘이라고 가정하는 경우, 사람에 의하여 시스템 등에 인가될 수 있는 힘의 주파수는 주로 0.5Hz 내지 5Hz이며, 주파수를 라디안 단위로 변환하는 경우, 3rad/s 내지 30rad/s이 된다. 따라서 $1/T_u$ = 3이며-> T_u = 1/3, 1/Tq = 30, Tq = 1/30으로 결정될 수 있다.

[0089] T_l은 어시스트의 양을 조절하는 파라미터로서 $T_u \geq T_l > T_q$ 에 존재하는 값을 가지고 원하는 어시스트의 양이 나오도록 튜닝을 하는 파라미터이다.

[0090] 따라서, 어시스트를 목적으로 하는 외력의 주파수에 따라 시정수 T_u, T_q를 결정하고, 의도하는 어시스트 양에 따라 $T_u \geq T_l > T_q$의 관계를 만족하는 파라미터 T_l을 결정하여, 수학식 4의 필터링 함수의 시정수를 결정할 수 있다.

[0091] 본 발명에 따른 메카트로닉 시스템의 제어방법은 주로 사람과 상호작용하는 시스템의 안전성 향상에 주안점이 있으므로, 메카트로닉 시스템의 종류에 따라 의도하는 어시스트 양에 따라 튜닝 파라미터 T_l을 결정할 수 있다.

[0092] 상기 필터링 함수를 이용하게 되면, 측정된 외력의 위상특성을 각 주파수영역에 따라 바꾸어주는 필터링 효과를 얻을 수 있다. 즉 상기 필터링 함수는 상기 억제 주파수영역에서는 상기 측정된 외력의 위상이 0도, 즉 정(正)부호의 특성을 가지도록 필터링하며, 어시스트 주파수 영역에서는 상기 측정된 외력이 180도, 즉 부(負)부호의 특성을 가지도록 필터링한다. 이를 통하여 상기 필터링 함수는 상기 억제 주파수영역의 외력에 대하여 높은 임피던스를 가지도록 하고, 상기 어시스트 주파수영역의 외력에 대하여 낮은 임피던스를 가지도록 할 수 있다. 또한 나머지 변수 T_l은 상기 어시스트 주파수 영역에서의 임피던스의 저감폭을 결정할 수 있는 변수로 T_u/T_l이 클수록 상기 어시스트 주파수 영역의 외력에 대한 임피던스는 더 낮아지게 된다.

[0093] 상기와 같이 시스템의 임피던스를 조절한 다음, 상기 필터링으로 조절된 임피던스를 유지하면서 로봇에게 주어진 소정의 작업을 자동적으로 할 수 있도록 하는 제어기를 설계한다(S270).

[0094] 소정의 작업을 위하여 주어지는 명령(r)에 대하여 로봇의 움직임이 상기 명령을 추종하도록 도 3의 피드백 제어기 C(s)를 설계할 수 있다. 이 설계과정은 기존의 로봇의 서보제어 설계와 같은 과정으로 설계할 수 있으나, 상기 어시스트 주파수 영역에서 낮아지는 임피던스 특성으로 인해 명령 추종의 성능이 낮아질 수가 있다. 따라서,

본 발명에서는 상기 피드포워드 제어기 F(s)를 부가적으로 설계함으로 저하된 명령 추종성능을 회복시키도록 한다.

[0095] 한편, 본 발명에 따른 제어방법은 상기 시스템을 안정화시키는 제어기 설계의 판단기준을 포함한다. 외력의 측정을 위하여 시스템의 동적모델을 이용하고 있으나 실제 시스템의 특성과 모델링한 동적모델 사이에 오차가 존재할 경우 시스템이 불안정하여 질 수 있다. 따라서, 상기 전체 시스템을 안정화시키는 것이 필요하며, 본 발명에서는 동적모델의 오차와 그 오차를 고려한 시스템의 안정조건을 명확하게 하여 시스템을 안정화시키는 제어기의 설계 기준을 제시한다. 이를 위하여 상기 시스템이 도 4와 같이 구현되는 경우에 하기 수학식 5를 이용하여 시스템이 안정화되는 조건을 명시할 수 있다.

수학식 5

[0096]
$$T_{r.tdof} = \frac{CP_n + Q}{1 + CP_n}$$

[0097] 상기 수학식 5는 소위 '강인제어 이론'에서 사용되는 상보감도함수(complimentary sensitivity function)로서, 도 4의 'in'에서 'out'까지의 전달함수로 구하여 진다. 모델링한 시스템의 동적특성 Pn(s)와 실제 시스템의 동적특성 P(s)사이의 오차를 하기 수학식 6과 같이 표시하여, 그 오차를 $\Delta(s)$를 이용하여 표기할 수 있다.

수학식 6

[0098]
$$P(s) = P_n(s)\,(1 + \Delta(s))$$

[0099] 시스템의 모델이 상기 수학식 6과 같이 $\Delta(s)$ 라는 오차를 가지고 있을 때, 도 4의 피드백 제어거 C(s)와 외란 필터링 Q(s)가 아래의 [수학식 7]을 만족시키도록 설계되면 전체 시스템을 안정화 시킬 수 있다.

수학식 7

[0100]
$$\| T_{r.tdof}(s)\Delta(s) \| < 0$$

[0101] 즉, Q(s)는 어시스트 주파수영역과 요구되는 어시스트의 크기에 따라 설계를 하고, C(s)는 로봇의 지령치 추종특성을 고려하며 설계하되, 상기 [수학식 7]을 만족시키는 범위 안에서 설계되어야 한다.

[0102] 한편, 전술한 제어방법은 실제로 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 구동부와 동작부를 제어하며, 상기 시스템에 가해지는 외력의 주파수 성분에 따라 상기 시스템의 임피던스를 조절하도록 설계된 제어기를 포함하며, 상기 구동부에 제공되는 구동전압 또는 구동전류 등을 변화시키는 제어부를 구비할 수 있다.

[0103] 한편, 상기 구동부는 시스템의 모터 등으로 이루어질 수 있으며, 상기 동작부는 상기 구동부의 구동에 의해 움직이게 되는 구조로 구성되며, 예를 들어 산업용 로봇의 경우 각각의 로봇팔 들이 동작부에 해당한다.

[0104] 도 5의 메카트로닉 시스템의 예로서의 산업용 로봇을 도시하며, 도 6은 도 5에 도시된 산업용 로봇에 본 발명을 적용하여 실험한 결과를 도시하며, 도 7은 도 5에 도시된 산업용 로봇의 충격실험의 예를 도시하며, 도 8은 도 5에 도시된 산업용 로봇의 충격실험의 결과를 도시하며, 도 9는 본 발명의 제어기에 피드포워드 제어기를 구비

함으로써 로봇팔의 명령 추종 특성의 실험결과를 도시한다.

[0105] 도 5를 참조하면, 산업용 로봇은 3개의 관절(10, 20, 30)과 상기 각 관절에 의해 회동가능하게 연결되는 3개의 암(40, 50, 60)을 구비하며, 구동부(70) 및 제어부(미도시)를 구비한다.

[0106] 도 5에 도시된 산업용 로봇에 본 발명을 적용하여 실험한 결과를 도 6에 표시하였다. 도 6에서 세로축은 각 암의 운동정도, 즉 회전각(rad)을 의미하며, 가로축은 시간을 의미한다. 예를 들어, 본 실험에서 T_u는 1/(20.5), T_l은 1/(20.7), T_q는 1/(23)으로 각각 설정되었다.

[0107] 도 6의 (A), (B), (C), (D) 및 (E)는 각각 0.1Hz, 0.4Hz, 0.7Hz, 1Hz, 2Hz의 외력을 부가하였을 때, 상기 로봇팔 동작부의 움직임을 본 발명을 적용하였을 때(청색)와 적용하지 않았을 때(적색)를 비교하였다. 0.5Hz보다 낮은 주파수(억제 주파수 영역)에서는 임피던스가 높게 설정이 되어 로봇팔의 움직임에 큰 변화가 없지만(도 6의 (A), (B)), 0.5Hz이상의 주파수 성분(어시스트 주파수 영역)을 가진 외력에 대하여 로봇팔의 움직임이 증폭되어 있음을 확인할 수 있다(도 6의 (C), (D), (E)).

[0108] 또한 본 발명자는 상기 로봇암에 의해 도 7과 같은 충격실험을 실행하여 도 8과 같은 실험결과를 얻었다.

[0109] 즉, 로봇암에 로드셀(load cell)을 장착하여, 특정 물체에 로봇암을 충격하는 충격시험을 수행하였다. 도 8은 로봇팔의 충격 시, 충격력을 비교한 실험결과에 해당한다. 도 8에서 세로축은 충격량(N)을, 세로축은 시간을 의미한다. 또한, 도 8에서 흑색 실선은 본 발명을 실시하지 않았을 경우, 적색 점선은 본 발명을 적용한 예로 T_l의 변수값을 1/2로 설정한 경우, 청색 파선은 본 발명을 적용한 예로 T_l의 변수값을 1/(20.7)로 설정한 경우이다.

[0110] 도 8에 도시된 바와 같이, 본 발명을 적용한 경우에 그 충격량을 줄일 수 있으며, 나아가 그 완화되는 정도를 T_l의 변수값을 조절함으로 충격력의 완화 정도를 조절할 수 있음을 보여주고 있다.

[0111] 한편, 본 발명에서는 상기 제어기에 피드포워드 제어기를 구비함으로써 로봇팔의 명령 추종 특성을 향상시킬 수 있음을 실험을 통하여 증명한 예를 도 9에 표시하였다. 도 9에서 세로축은 각 암의 운동정도, 즉 회전각(rad)을 의미하며, 가로축은 시간을 의미한다.

[0112] 도 9를 참조하면, 흑색실선이 추종해야하는 명령, 적색 점선이 피드포워드 제어기를 구비하지 않은 경우의 제어 결과, 청색 파선이 피드포워드 제어기를 구비한 경우의 제어 결과를 나타내고 있다. 명령의 주파수가 높아질수록 피드포워드 제어기를 구비하지 않은 제어의 추종성능이 저하되나, 피드포워드 제어기를 적용함으로 저하되었던 추종성능이 회복됨을 보이고 있다.

[0113] 본 명세서는 본 발명의 바람직한 실시예를 참조하여 설명하였지만, 해당 기술 분야의 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

[0114] r : 기준 입력

e : 추종 오차

u : 제어 입력

y : 시스템 출력

v : 속도 입력

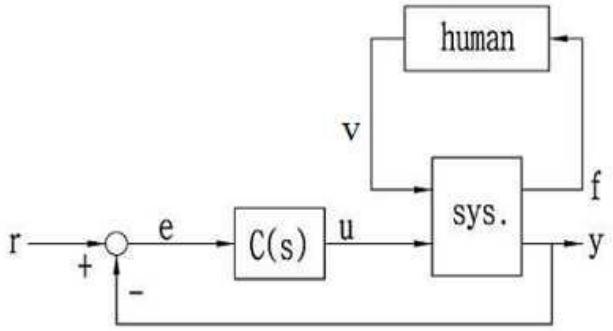
f : 속도 입력에 의해 유도되는 저항력

C(s) : 피드백 제어기

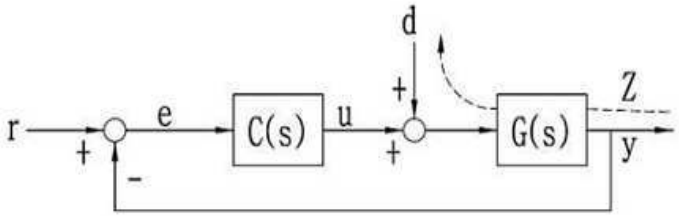
G(s) : 플랜트

도면

도면1

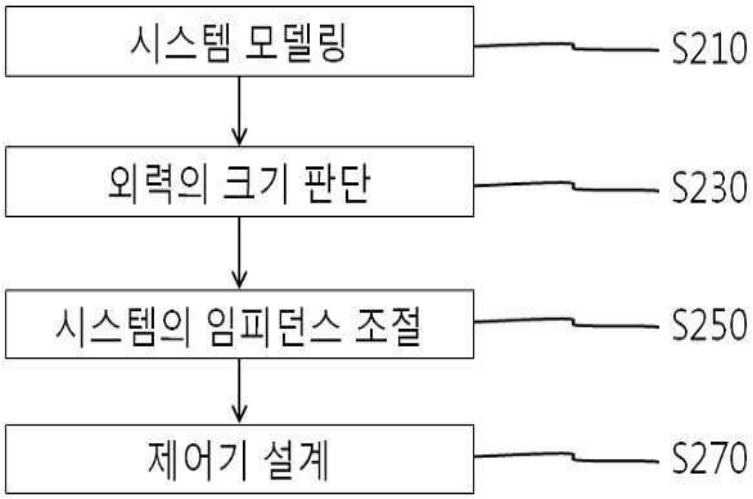


(a)

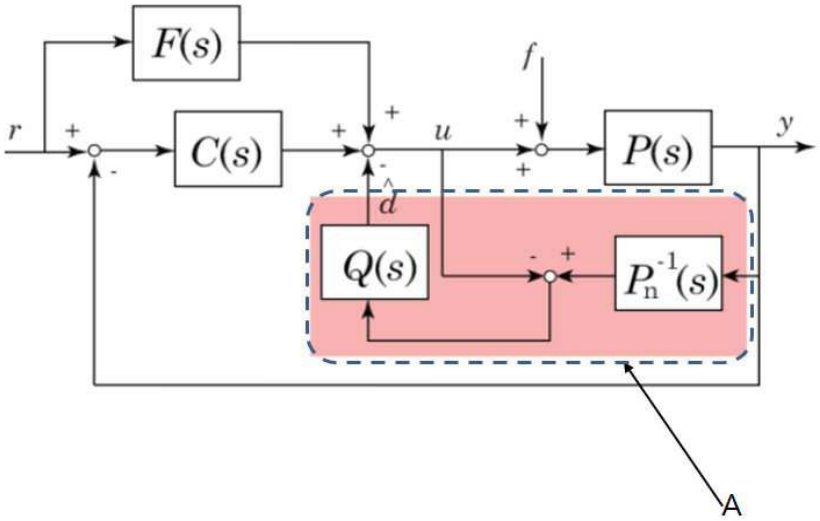


(b)

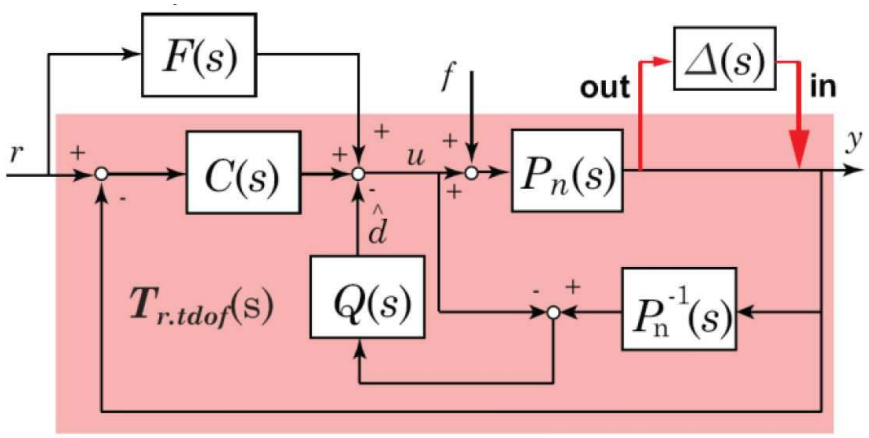
도면2


시스템 모델링
S210
외력의 크기 판단
S230
시스템의 임피던스 조절
S250
제어기 설계
S270

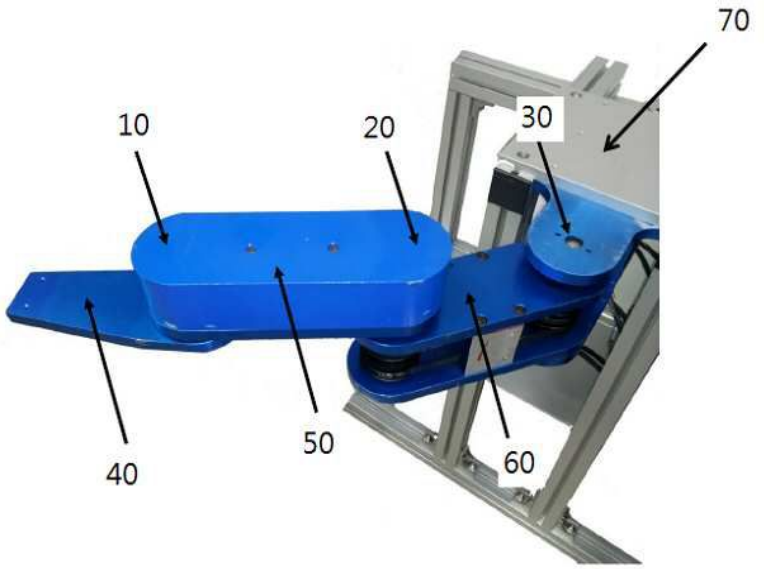
도면3


F(s)
C(s)
P(s)
Q(s)
P_n^-1(s)
r
u
f
y
d
A

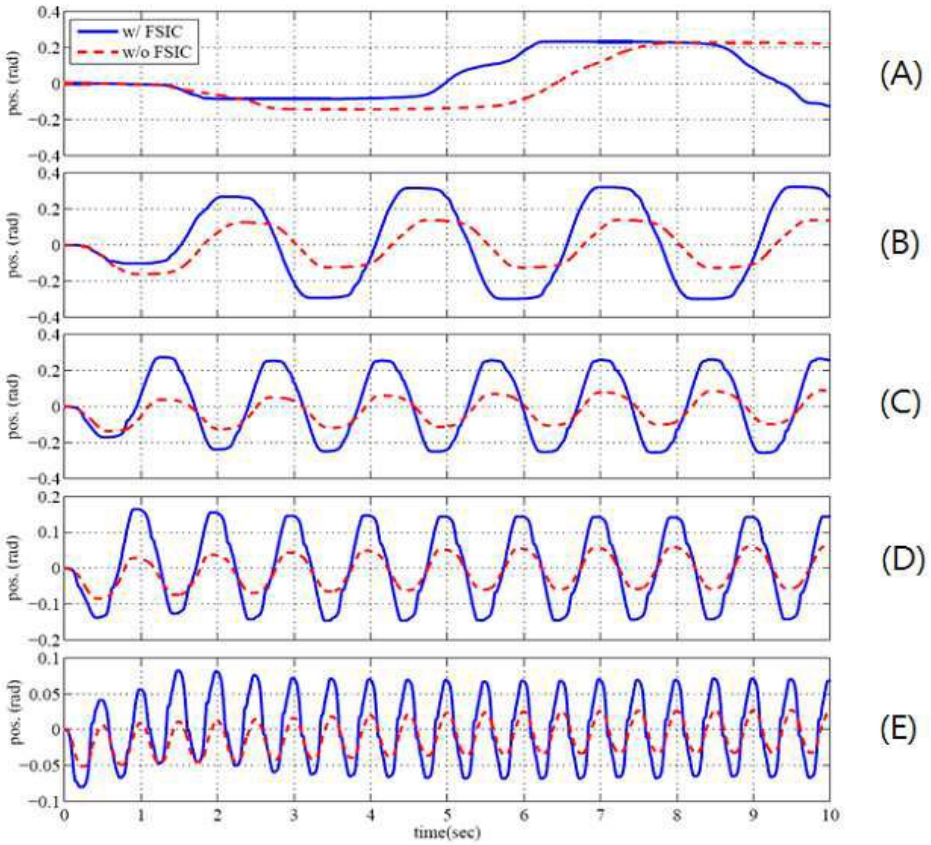
도면4



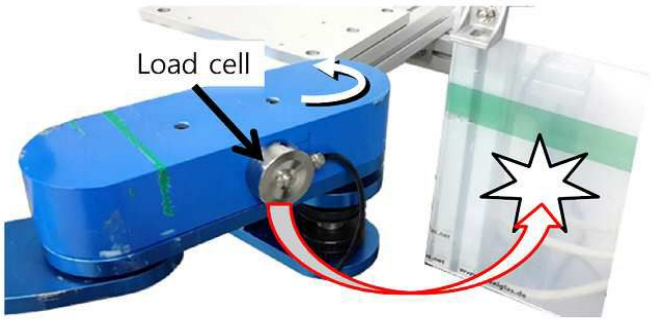
도면5



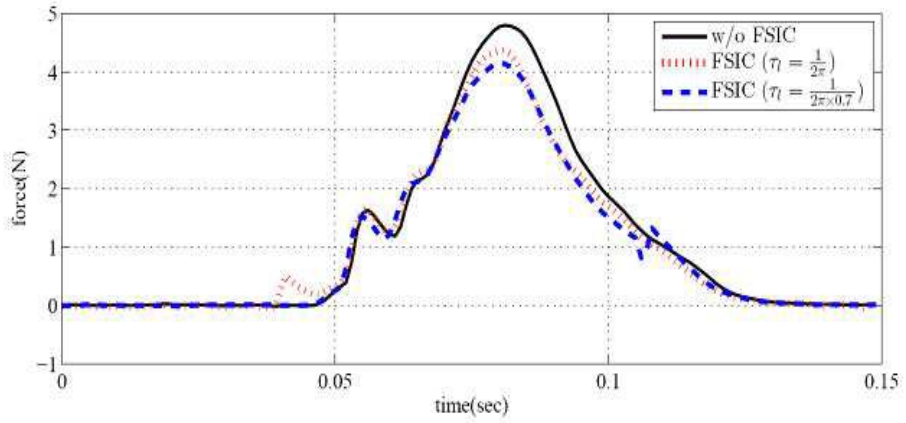
도면6



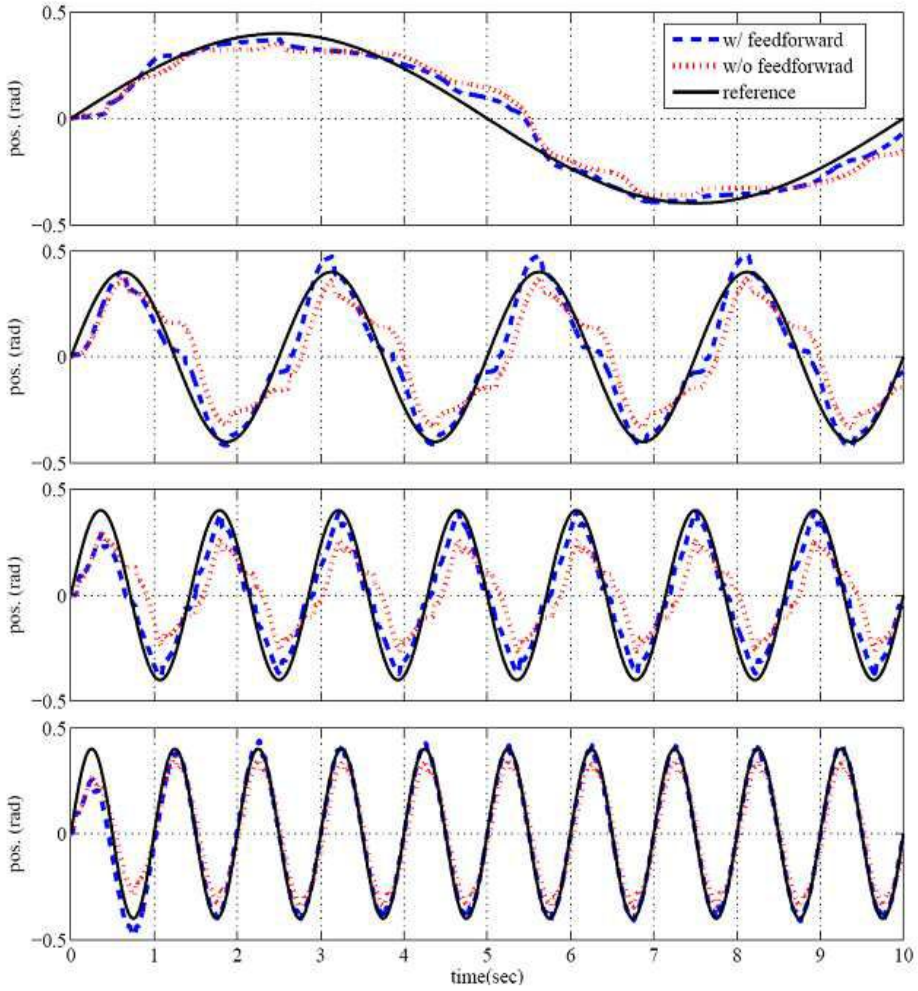
도면7



도면8


w/o FSIC
FSIC ($\tau_l = \frac{1}{2\pi}$)
FSIC ($\tau_l = \frac{1}{2\pi \times 0.7}$)
force(N)
time(sec)

도면9


w/ feedforward
w/o feedforwrad
reference
pos. (rad)
time(sec)