



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2016-0137308
(43) 공개일자 2016년11월30일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
B25J 9/16 (2006.01) B25J 13/08 (2006.01)
(52) CPC특허분류
B25J 9/1689 (2013.01)
B25J 13/087 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2015-0126014
(22) 출원일자 2015년09월07일
심사청구일자 2015년09월07일
(30) 우선권주장
1020150071524 2015년05월22일 대한민국(KR)

(71) 출원인
한국기술교육대학교 산학협력단
충남 천안시 동남구 병천면 충절로 1600, 내 (한국기술교육대학교)
(72) 발명자
유지환
충청남도 천안시 동남구 병천면 충절로 1600 한국기술교육대학교
아킬 자파리
충남 천안시 병천면 가전리 한국기술교육대학교
(74) 대리인
이성원

전체 청구항 수 : 총 5 항

(54) 발명의 명칭 상태 안정화를 위한 입출력 제어 시스템

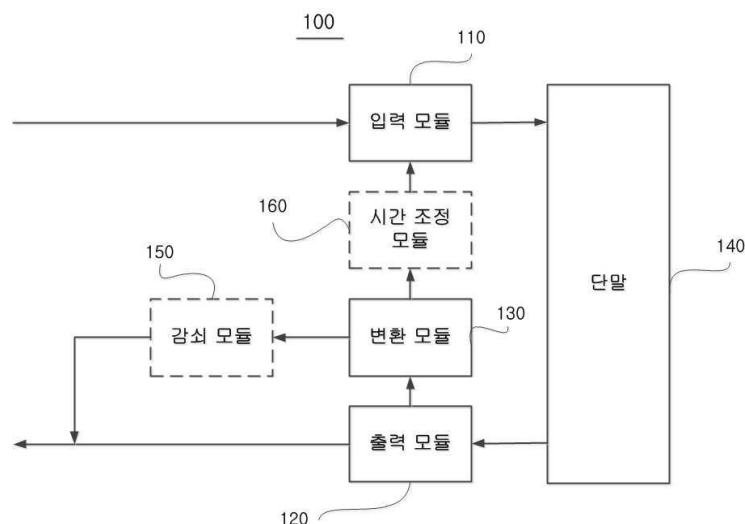
(57) 요약

상태 안정화를 위한 입출력 제어 시스템이 개시된다. 입력(x) 및 변환값을 제공하는 입력 모듈, 출력(f)을 제

공받는 출력 모듈, 상기 출력 모듈에서 제공받은 출력(f)에 변환식($\frac{1}{\mu_{\max}}$)을 적용하여 상기 변환값을 산출하고, 상기 변환값을 상기 입력 모듈에 제공하는 변환 모듈 및 상기 입력 모듈로부터 상기 입력(x) 및 상기 변환값을 제공받고, 상기 출력(f)을 상기 출력 모듈로 제공하는 단말을 포함하여 구성되며,

$\mu_{\max} \geq \max \left\{ \frac{\Delta f}{\Delta x} \right\}$ 인 것일 수 있다. 상술한 구성에 의하면, 입력과 출력을 제어하여 시스템의 상태 안정화를 수행함으로써, 에너지가 비정상적으로 커져서 시스템이 불안정화되는 것을 방지할 수 있는 효과가 있다.

대표도 - 도16



(52) CPC특허분류
B25J 9/1692 (2013.01)

명세서

청구범위

청구항 1

입력(x) 및 변환값을 제공하는 입력 모듈;

출력(f)을 제공받는 출력 모듈;

상기 출력 모듈에서 제공받은 출력(f)에 변환식($\frac{1}{\mu_{\max}}$)을 적용하여 상기 변환값을 산출하고, 상기 변환값을 상기 입력 모듈에 제공하는 변환 모듈; 및

상기 입력 모듈로부터 상기 입력(x) 및 상기 변환값을 제공받고, 상기 출력(f)을 상기 출력 모듈로 제공하는 단말;

을 포함하여 구성되며,

$\mu_{\max} \geq \max \left\{ \frac{\Delta f}{\Delta x} \right\}$ 인 것을 특징으로 하는 상태 안정화를 위한 입출력 제어 시스템.

청구항 2

제1항에 있어서,

상기 출력 모듈의 출력(f)에 추가적인 감쇠를 위한 감쇠 모듈을 더 포함하는 것을 특징으로 하는 상태 안정화를 위한 입출력 제어 시스템.

청구항 3

제1항에 있어서,

상기 변환 모듈에서 상기 입력 모듈에 제공한 변환값에 대하여 제공 시간을 조정하는 시간 조정 모듈을 더 포함하는 것을 특징으로 하는 상태 안정화를 위한 입출력 제어 시스템.

청구항 4

제1항에 있어서,

상기 입력 모듈은 복수의 입력을 제공하고, 상기 출력 모듈은 복수의 출력을 제공받는 경우에 있어서,

상기 변환 모듈은 상기 복수의 출력 중에서 적어도 하나의 출력을 이용하여 변환값을 산출하고, 상기 산출된 변환값을 상기 입력 모듈에 제공하며,

상기 단말은 상기 입력 모듈로부터 복수의 입력 및 적어도 하나의 변환값을 제공받는 것을 특징으로 하는 상태 안정화를 위한 입출력 제어 시스템.

청구항 5

입력(x) 및 변환값을 제공하는 입력 모듈;

출력(f)을 제공받는 출력 모듈;

상기 출력 모듈에서 제공받은 출력(f)에 변환식($\alpha \frac{1}{\mu_{\max}}$)을 적용하여 상기 변환값을 산출하고, 상기 변환값을 상기 입력 모듈에 제공하는 변환 모듈; 및

상기 입력 모듈로부터 상기 입력(x) 및 상기 변환값을 제공받고, 상기 출력(f)을 상기 출력 모듈로 제공하는 단말;

을 포함하여 구성되며,

α 는 상수이고, $\mu_{\max} \geq \max \left\{ \frac{\Delta f}{\Delta x} \right\}$ 인 것을 특징으로 하는 상태 안정화를 위한 입출력 제어 시스템.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 상태 안정화를 위한 입출력 제어 시스템에 관한 것으로서, 구체적으로는 안정성을 보장하는 상태 안정화를 위한 입출력 제어 시스템에 관한 것이다.

배경 기술

[0002] 최근에는 사용자의 햅틱 동작 즉, 컵을 손으로 집어 들어올리는 동작을 입력 받아 그대로 로봇이나 기타 구동기가 그대로 구현하는 시스템에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다.

[0003] 사용자의 햅틱 동작은 실물 로봇과 같은 실제 환경의 객체에서 구현되기도 하지만, 가상 환경(virtual environment)의 객체에 구현되기도 한다.

[0004] 이처럼 외부 환경(external environment)에서 구현되는 사용자의 햅틱 구동 제어는 원격 조종되도록 구성될 수 있다.

[0005] 그런데, 사용자의 햅틱 입력 동작은 그에 상응하게 객체의 출력 동작으로 이어져야 하지만, 동작의 진행됨에 따라 입력과 출력간의 제어가 제대로 되지 않아 시스템의 불안정이 초래되는 문제점이 있다. 즉, 사용자의 입력치에 따라 그대로 객체의 동작이 이루어져야 하지만, 시스템 동작상 에너지의 소실이라든가 에러 등으로 인해 출력치가 과도하게 발산하거나 감소하는 등의 오동작이 발생할 수 있다. 이에, 출력치를 지속적으로 보정하여 피드백 함으로써, 입력 상태를 안정화시킬 수 있는 방안이 요구된다.

[0006] 종래에는 수동성 이론(passivity theory)이 안정된 인터랙션(stable interaction)을 위한 주요 수학적 수단으로 이용되어 왔다. 시스템 파라미터(system parameters)와는 별도로 입출력 정보만을 이용하며, 선형 또는 비선형 시스템에 모두 적용된다.

[0007] 이러한 수동성 이론으로부터 변수 접근 방식(variable approach), 시간 영역 수동성 접근 방식(time domain passivity approach), 수동성 기반 메모리 접근 방식(memory based passivation approach)과 같은 다양한 이론들이 제시되어 있다.

[0008] 이러한 많은 연구들이 안정된 햅틱 인터랙션(stable haptic interaction)을 보장하기 위하여 수동성 이론을 이용해 왔으나, 수동성은 안정화를 위한 충분 조건 중의 하나일 뿐이며 본질적인 문제를 겪고 있다.

[0009] 2-포트 네트워크는 시스템을 불안정하게 하지만, 시스템 1-포트 임피던스가 존재하지 않는다면 안정될 수 있다. 햅틱 시뮬레이션(haptic simulation)은 휴먼 오퍼레이터(human operator)와 외부 환경(external environment)이 수동적이기만 하면 안정될 수 있다.

[0010] 그러나, 절대적인 안정화는 여러 한계에 부딪히게 되는데, 절대적인 안정을 위한 충분 조건이 주파수 영역에서

제시되며 또한 시스템 파라미터를 포함하고 있다는 점에서 여러 가지 구현의 면에서 적합하지 않은 실정이다.

발명의 내용

해결하려는 과제

[0011] 본 발명의 목적은 안정성을 보장하는 상태 안정화를 위한 입출력 제어 시스템을 제공하는 데 있다.

과제의 해결 수단

[0012] 상술한 본 발명의 목적에 따른 상태 안정화를 위한 입출력 제어 시스템은 입력(x) 및 변환값을 제공하는 입력

모듈, 출력(f)을 제공받는 출력 모듈, 상기 출력 모듈에서 제공받은 출력(f)에 변환식($\frac{1}{\mu_{\max}}$)을 적용하여 상기 변환값을 산출하고, 상기 변환값을 상기 입력 모듈에 제공하는 변환 모듈 및 상기 입력 모듈로부터 상기 입력(x) 및 상기 변환값을 제공받고, 상기 출력(f)을 상기 출력 모듈로 제공하는 단말;을 포함하여 구성될 수

있으며,
$$\mu_{\max} \geq \max \left\{ \frac{\Delta f}{\Delta x} \right\}$$
인 것일 수 있다.

[0013] 여기에서, 상기 출력 모듈의 출력(f)에 추가적인 감쇠를 위한 감쇠 모듈을 더 포함하는 것일 수 있다.

[0014] 여기에서, 상기 변환 모듈에서 상기 입력 모듈에 변환값을 제공하는 것은 시간 지연을 고려하여 제공하는 것일 수 있다.

[0015] 여기에서, 상기 입력 모듈은 복수의 입력을 제공하고, 상기 출력 모듈은 복수의 출력을 제공받는 경우에 있어서, 상기 변환 모듈은 상기 복수의 출력 중에서 적어도 하나의 출력을 이용하여 변환값을 산출하고, 상기 산출된 변환값을 상기 입력 모듈에 제공하며, 상기 단말은 상기 입력 모듈로부터 복수의 입력 및 적어도 하나의 변환값을 제공받는 것일 수 있다.

[0016] 상술한 본 발명의 목적에 따른 상태 안정화를 위한 입출력 제어 시스템은 입력(x) 및 변환값을 제공하는 입력 모듈; 출력(f)을 제공받는 출력 모듈; 상기 출력 모듈에서 제공받은 출력(f)에 변환식($\alpha \frac{1}{\mu_{\max}}$)을 적용하여 상기 변환값을 산출하고, 상기 변환값을 상기 입력 모듈에 제공하는 변환 모듈; 및 상기 입력 모듈로부터 상기 입력(x) 및 상기 변환값을 제공받고, 상기 출력(f)을 상기 출력 모듈로 제공하는 단말;을 포함하여 구성되며,

α 는 상수이고,
$$\mu_{\max} \geq \max \left\{ \frac{\Delta f}{\Delta x} \right\}$$
인 것일 수 있다.

발명의 효과

[0017] 상술한 상태 안정화를 위한 입출력 제어 시스템에 의하면, 외부 환경의 단말을 제어함에 있어서 입력치와 출력치를 피드백 제어하여 입력 상태 안정화를 수행함으로써, 에너지가 비정상적으로 커져서 시스템이 불안정화되는 것을 방지할 수 있는 효과가 있다.

도면의 간단한 설명

[0018] 도 1은 본 발명의 일 실시예에 따른 1-포트 네트워크의 구성도이다.

도 2는 본 발명의 일 실시예에 따른 입력 상태 안정화 상태의 일 예시이다.

도 3는 본 발명의 일 실시예에 따른 입력 상태 안정화의 행동 상태도이다.

도 4는 본 발명의 일 실시예에 따른 임피던스 타입 햅틱 인터페이스의 모식도이다.

도 5는 본 발명에 따른 위치와 힘의 궤적을 나타내는 그래프이다.

- 도 6은 본 발명의 일 실시예에 따른 반시계 방향의 히스테리시스로부터의 입출력 행동을 나타내는 그래프이다.
- 도 7은 본 발명의 일 실시예에 따른 제안된 입력 상태 안정화 접근법의 제어 구조도이다.
- 도 8은 본 발명의 일 실시예에 따른 멀티-DOF 인터랙션의 궤적을 나타내는 그래프이다.
- 도 9는 본 발명의 일 실시예에 따른 이동 가상 물체의 각 DOF에서의 표현을 나타내는 도면이다.
- 도 10은 본 발명의 일 실시예에 따른 위치 vs. 힘의 응답과 위치 응답을 나타내는 그래프이다.
- 도 11은 본 발명의 일 실시예에 따른 각 DOF에서 이동 가상 물체의 변환을 나타내는 도면이다.
- 도 12는 본 발명의 일 실시예에 따른 이동 가상 물체의 변환 구성도이다.
- 도 13은 본 발명의 일 실시예에 따른 예러 vs. 힘 응답을 나타내는 그래프이다.
- 도 14는 본 발명의 일 실시예에 따른 햅틱 컨트롤러의 구성도이다.
- 도 15는 본 발명의 일 실시예에 따른 2-포트 햅틱 컨트롤러의 입력과 출력의 그래프이다.
- 도 16은 본 발명의 일 실시예에 따른 상태 안정화를 위한 입출력 제어 시스템의 구성도이다.
- 도 17은 본 발명의 다른 실시예에 따른 상태 안정화를 위한 입출력 제어 시스템의 구성도이다.
- 도 18은 본 발명의 또 다른 실시예에 따른 상태 안정화를 위한 입출력 제어 시스템의 구성도이다.
- 도 19는 본 발명의 또 다른 실시예에 따른 상태 안정화를 위한 입출력 제어 시스템의 예시도이다.
- 도 20은 본 발명의 또 다른 실시예에 따른 상태 안정화를 위한 입출력 제어 시스템의 예시도이다.
- 도 21은 본 발명의 또 다른 실시예에 따른 상태 안정화를 위한 입출력 제어 시스템의 예시도이다.
- 도 22는 본 발명의 또 다른 실시예에 따른 상태 안정화를 위한 입출력 제어 시스템의 예시도이다.
- 도 23은 본 발명의 또 다른 실시예에 따른 상태 안정화를 위한 입출력 제어 시스템의 예시도이다.
- 도 24는 본 발명의 또 다른 실시예에 따른 상태 안정화를 위한 입출력 제어 시스템의 예시도이다.
- 도 25는 본 발명의 또 다른 실시예에 따른 상태 안정화를 위한 입출력 제어 시스템의 예시도이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

- [0019] 본 발명은 다양한 변경을 가할 수 있고 여러 가지 실시예를 가질 수 있는 바, 특정 실시 예들을 도면에 예시하고 발명을 실시하기 위한 구체적인 내용에 상세하게 설명하고자 한다. 그러나, 이는 본 발명을 특정한 실시 형태에 대해 한정하려는 것이 아니며, 본 발명의 사상 및 기술 범위에 포함되는 모든 변경, 균등물 내지 대체물을 포함하는 것으로 이해되어야 한다. 각 도면을 설명하면서 유사한 참조부호를 유사한 구성요소에 대해 사용하였다.
- [0020] 제1, 제2, A, B 등의 용어는 다양한 구성요소들을 설명하는데 사용될 수 있지만, 상기 구성요소들은 상기 용어들에 의해 한정되어서는 안 된다. 상기 용어들은 하나의 구성요소를 다른 구성요소로부터 구별하는 목적으로만 사용된다. 예를 들어, 본 발명의 권리 범위를 벗어나지 않으면서 제1 구성요소는 제2 구성요소로 명명될 수 있고, 유사하게 제2 구성요소도 제1 구성요소로 명명될 수 있다. 및/또는 이라는 용어는 복수의 관련된 기재된 항목들의 조합 또는 복수의 관련된 기재된 항목들 중의 어느 항목을 포함한다.
- [0021] 어떤 구성요소가 다른 구성요소에 "연결되어" 있다거나 "접속되어" 있다고 언급된 때에는, 그 다른 구성요소에 직접적으로 연결되어 있거나 또는 접속되어 있을 수도 있지만, 중간에 다른 구성요소가 존재할 수도 있다고 이해되어야 할 것이다. 반면에, 어떤 구성요소가 다른 구성요소에 "직접 연결되어" 있다거나 "직접 접속되어" 있다고 언급된 때에는, 중간에 다른 구성요소가 존재하지 않는 것으로 이해되어야 할 것이다.
- [0022] 본 출원에서 사용한 용어는 단지 특정한 실시예를 설명하기 위해 사용된 것으로, 본 발명을 한정하려는 의도가 아니다. 단수의 표현은 문맥상 명백하게 다르게 뜻하지 않는 한, 복수의 표현을 포함한다. 본 출원에서, "포함하다" 또는 "가지다" 등의 용어는 명세서상에 기재된 특징, 숫자, 단계, 동작, 구성요소, 부품 또는 이들을 조합한 것이 존재함을 지정하려는 것이지, 하나 또는 그 이상의 다른 특징들이나 숫자, 단계, 동작, 구성요소, 부품 또는 이들을 조합한 것들의 존재 또는 부가 가능성을 미리 배제하지 않는 것으로 이해되어야 한다.

[0023] 다르게 정의되지 않는 한, 기술적이거나 과학적인 용어를 포함해서 여기서 사용되는 모든 용어들은 본 발명이 속하는 기술 분야에서 통상의 지식을 가진 자에 의해 일반적으로 이해되는 것과 동일한 의미를 가지고 있다. 일반적으로 사용되는 사전에 정의되어 있는 것과 같은 용어들은 관련 기술의 문맥 상 가지는 의미와 일치하는 의미를 가지는 것으로 해석되어야 하며, 본 출원에서 명백하게 정의하지 않는 한, 이상적이거나 과도하게 형식적인 의미로 해석되지 않는다.

[0024] 이하, 본 발명에 따른 바람직한 실시예를 첨부된 도면을 참조하여 상세하게 설명한다.

[0025] 2. 입력 상태 안정화(input-to-state stability)와 소모적 시스템(dissipative system)

[0026] 입력 상태 안정화와 소모적 시스템에 대한 특징과 수학적 배경을 1-포트 네트워크 시스템에 적용하여 설명한다. 도 1에 도식된 바와 같이, 상태 x 에서 $(u(t) \mapsto f(t))$ 가 성립한다. 손탁(Sontag)에 의해 도출된 입력 상태 안정화 수식에 의하여, $\beta(|x_0|, t)$ and $\gamma(\|u\|_\infty)$ 과 같은 조건은 다음과 같은 관계를 모든 해법에 서 반드시 만족해야 한다.

$$[0027] \quad |x(t)| \leq \beta(|x_0|, t) + \gamma(\|u\|_\infty)$$

[0028] 위의 관계식에서, 함수 $\gamma: \mathbb{R}_+ \rightarrow \mathbb{R}_+$ 는 연속적이어야 하며, $\gamma(0) = 0$ 및 $\lim_{s \rightarrow \infty} \gamma(s) = \infty$ 과 같이 엄격하게 증가해야 한다. 또한, 각각의 고정된 $\varsigma \in \mathbb{R}_+$ 에서 함수 $\beta(\cdot, \varsigma)$ 이 연속적이고 엄격하게는 증가해야 하며, 각각의 고정된 $s \in \mathbb{R}_+$ 에서 함수 $\beta(s, \cdot)$ 는 반드시 감소해야 하며, $\lim_{\varsigma \rightarrow \infty} \beta(s, \cdot) = 0$ 를 만족해야 한다.

[0029] 직관적으로 볼 때, 입력 상태 안정화 방법은 상태의 평균은 큰 t 에 대한 입력의 균일한 평균의 함수는 반드시 한정적(bounded)이어야 한다. (왜냐 하면, $t \rightarrow \infty$ 가 됨에 따라 $\beta(|x_0|, t) \rightarrow 0$ 가 되기 때문임) $\beta(|x_0|, t)$ 는 작은 t 에 대하여 지배적일 수 있으나, 이것은 도 2와 같이, x_0 의 초기 상태 크기에 대한 함수로서의 전이 행동에 대한 크기의 정량화를 제공한다.

[0030] 입력 상태 안정화는 점근적 이득(asymptotic gain), 단단한 여분(robustness margins)의 존재, 소모성(dissipativity) 및 에너지 유사한 안정성 추정(stability estimate) 등과 같은 여러 다른 개념들과 동일한 성격을 갖는다. 다음의 정리(theorem)는 입력 상태 안정화(input-to-state stability)와 소모성(dissipativity) 간의 연관관계를 나타낸다.

[0031] 정리(theorem) 2.1: 소모적(dissipative)인 시스템(system)은 적어도 입력 상태 안정화(input-to-state stability)를 만족한다.

[0032] 그러므로, 시스템의 소모성을 만족한다는 것은 시스템이 입력 상태 안정화(input-to-state stability) 성격을 갖는다는 것이다. 다음의 정리는 소모성(dissipativity)을 위한 충분 조건을 제공한다.

[0033] 정리(theorem) 2.2: 도 1에 도식된 바와 같이, 공급률(supply rate) s 를 갖는 시스템이 있다고 가정한다. 시스템은 다음 수학적 식 1과 같은 조건이면 공급률 $s(u(t), f(t))$ 에 대하여 소모적(dissipative)이 된다.

수학적 식 1

$$S_a(x_0) = \sup_{\substack{u(\cdot) \\ T \geq 0}} - \int_0^T s(u(t), f(t)) dt, \quad x(0) = x_0 \text{ is finite } (< \infty)$$

[0034]

[0035] 정리 2에서, 공급률 s 를 힘과 속도의 곱($f(t) \cdot \dot{x}(t)$)과 같은 시스템의 켈레 파워(conjugate power)로 선택

하는 경우, $S_a(x_0)$ 는 초기 조건 x_0 부터 출발한 시스템으로부터 추출된 최대의 에너지로 간주할 수 있다. 그러므로, 함수 S_a 는 이용 가능한 에너지 스토리지(available energy storage)로 볼 수 있다. 직관적으로, 이용 가능한 에너지 스토리지가 모든 초기 조건 x_0 이기만 하다면, 시스템은 소모적이라는 것을 정리 2는 말하고 있는 것이다.

[0036] 수동성 기준(passivity criterion)의 비교를 위하여, 소모성 기준(dissipativity criterion)은 수학적 2와 같이 표현될 수 있다.

수학적 2

$$\int_0^T f_e(t)\dot{x}(t)dt \geq -\alpha$$

[0037]

[0038] 수학적 2에 대하여 1-포트 네트워크는 한정된 양의 출력 에너지를 생성한다는 물리적 해석을 할 수 있다. 만약, 1-포트 네트워크가 수학적 2를 만족한다면, 정리 2.1과 정리 2.2에 의해서, 1-포트 네트워크는 소모적이며, 입력 상태 안정화 상태, 즉, 모든 $t \geq 0$ 에 대하여 상태는 한정적이라고 결론지을 수 있다. 그러므로, 1-포트 네트워크에서 입력 상태 안정화를 제공하기 위해서는, 생성되는 에너지가 한정적인 값(finite value) ($\alpha < \infty$)을 갖는 것으로 충분하다고 할 수 있다. 소모성(dissipativity) 및 입력 상태 안정화 기준(ISS criterion)을 수동성 기준(passivity criterion)과 비교하면, 입력 상태 안정화 기준(ISS criterion)은 수동성 기준에 비하여 덜 보수적임을 알 수 있다. 수동성 기준(passivity criterion)에서는 초기 에너지 스토리지 값이 제로(zero) 또는 최대 미리 결정된 값에 한정되는 반면에, 입력 상태 안정화 기준(ISS criterion)에서는 추출될 수 있는 출력 에너지에 대한 미리 결정되지 않은 한정적인 양을 허용한다는 측면에서 위와 같이 해석될 수 있다.

[0039] 위에서 언급된 바와 같이, 입력 상태 안정화 기준(ISS criterion)은 수동성 기준에 비하여 덜 보수적임을 알 수 있다. 수동성 영역(Passive region)은 입력 상태 안정화 영역(ISS region)의 부분 집합이다. 도 3은 입력 상태 안정화 기준(ISS criterion)을 지키는 시스템의 상태 행동을 도시하는 모식도이다. 시스템은 시스템에 초기 저장된 값보다 더 큰 유한한 양의 에너지를 생성할 수 있다. 그러므로, 상태는 수동성 영역을 벗어나는 것이 가능하다.

[0040] 3. 입력 상태 안정화 접근법(input-to-state stable approach)

[0041] 입력 상태 안정화(input-to-state stability) 조건을 충분히 만족하는 방법을 이용하여 햅틱 인터페이스(haptic interface)를 생성하는 새로운 안정된 햅틱 상호작용 방법을 제안한다. 도 4에 도시된 바와 같이, 일반적으로, 햅틱 인터페이스(haptic interface)는 4개의 구성요소로 구성된다. 휴먼 오퍼레이터, 햅틱 디바이스, ZOH(Zero-Order Hold)를 포함하는 이산 인터페이스 및 외부 환경, virtual interface)으로 구성된다. *를 포함한 변수는 이산 도메인(discrete domain)에서의 신호를 나타내며, *를 포함하지 않은 변수는 연속 도메인(continuous domain)에서의 신호를 나타낸다. 연속 도메인과 이산 도메인은 전통적으로 햅틱 디바이스 위치(x_d)와 ZOH(Zero-Order Hold)에 대한 외부환경으로부터의 피드백 힘의 명령(f_d^*)에 대한 직접적인 검출로 이산 인터페이스를 통하여 상호 연결되어 있다.

[0042] 도 4에 나타난 이산 인터페이스는 에너지 소실의 주요한 원천으로 잘 알려져 있다. 위치(x_d)와 힘(f_d)은 수동성 정리(passivity theorem)의 수학적 정의에 기반하여 쉽게 에너지 소실을 설명할 수 있다. 전체 생성 에너지가 시스템을 통해 통과되도록 허용된다면, 높은 스티프니스(stiffness) 렌더링 또는 낮은 샘플링 레이트(sampling rate)의 경우에 불안정을 초래할 수 있다. 그러므로, 인터액션의 안정성을 고려한다는 것은 햅틱 인터페이스를 디자인하는 과업이 반드시 필요한 것이다.

[0043] 히스테리시스 비선형성(hysteresis nonlinearity)을 갖는 시스템을 외부환경으로 고려할 때, 안정한 햅틱 인터액션을 위하여 입력 상태 안정화 접근(ISS approach) 방법을 디자인함에 있어서 히스테리시스 비선형성

(hysteresis nonlinearity) 성질의 장점을 이용할 수 있다.

- [0044] 정의(Definition) 3.1: 히스테리시스(Hysteresis)는 단일 값의 함수로 표현되지 아니하는 2개의 시간 의존적인 양 간의 입력-출력 관련성을 나타낸다.
- [0045] 히스테리시스 비선형성(hysteresis nonlinearity)을 갖는 시스템에서, 입력-출력 관련성(relationship)은 일반적으로 도 6과 같은 에너지 교환의 관계에 있어서, 시계방향(clockwise) 또는 반시계방향(counter-clockwise) 중 어느 하나의 루프(loop) 형태를 가진다. 도 5에 도시된 바와 같이, 외부환경에 대한 위치와 힘의 관계는 이산형 시간 샘플링, 위치 검출 센서의 한정된 해상도 및 ZOH(Zero-Order Hold)의 특징에 따라 계단형의 행동 특성을 나타낸다.
- [0046] 실선은 이상적인 외부 환경 내지는 가상 환경(virtual environment)의 행동(behavior)을 나타내며, 반면, 점선은 이산 가상 환경(discrete virtual environment)의 실제 행동을 나타낸다. 프레싱(pressing) 곡선은 휴먼 오퍼레이터가 외부 환경과의 접촉을 설정한 이후에 시작된다. 릴리싱(releasing) 곡선은 휴먼 오퍼레이터가 센싱 지연과 계산 지연 때문에 외부 환경과 더 이상 접촉되지 않을 때 종료된다. 그러므로, 외부 환경의 위치(position) vs. 힘(force)의 행동은 단일값(single-value) 함수로서 표현될 수 없으며 이는 프레싱 경로(pressing path)가 릴리싱 경로(releasing path)와 동일하지 않기 때문이다.
- [0047] 이에, 정의(definition) 3.1에 기반하여, 도 5에 표현된 위치 vs. 힘의 행동을 갖는 외부 환경이 도 6에 도시된 반시계 방향 히스테리시스(counter-clockwise hysteresis)의 시스템으로 정의될 수 있다. 그리고 햅틱 인터랙션을 위한 ISS 제어 구조를 설계하기 위해 히스테리시스 특성을 이용할 수 있다.
- [0048] 히스테리시스 비선형 시스템의 클래스는 다섯 가지 성질로 규정될 수 있으며, 이러한 성질은 비선형 요소의 기본적인 특질에 의해 특징지어질 수 있다. 여기에서는 ISS 접근법(ISS approach)을 발전시키기 위하여 네 번째 성질을 이용할 것이다. 네 번째 성질은 외부 환경에 대한 입출력 쌍의 시간 미분값($\dot{x}_d$ 와 $\dot{f}_d$)은 섹터 한정적(sector bounded)이 된다는 것이다.

수학식 3

$$\dot{f}_d(t)\dot{x}_d(t) - \frac{1}{\mu_{\max}}\dot{f}_d^2(t) \geq 0$$

- [0049]
- [0050] 그리고, 이산 도메인에서는 수학식 4와 같이 표현될 수 있다.

수학식 4

$$\dot{f}_d(n)\dot{x}_d(n) - \frac{1}{\mu_{\max}}\dot{f}_d^2(n) \geq 0$$

- [0051]
- [0052] 여기에서, $\mu_{\max}$ 는 $0 \leq f'_d(x_d) \leq \mu_{\max}$ 와 같은 성질을 갖는 외부환경의 최대 기울기이며, $f'_d(x_d)$ 는 위치와 힘의 그래프에서 위치 $x_d(n)$ 의 한정적 기울기이다.

수학식 5

$$f'_d(x_d) = \frac{\Delta f_d}{\Delta x_d} = \frac{f_d(n) - f_d(n-1)}{x_d(n) - x_d(n-1)}$$

- [0053]

[0054] 여기에서 n 은 외부환경의 샘플링 시간을 나타낸다.

[0055] 햅틱 인터페이스의 요소 중에서, 휴먼 오퍼레이터와 햅틱 디바이스는 본질적으로 소모적이다. 반면에, 외부 환경은 소모적이지 않다. 여기에서, 외부 환경을 소모적인 외부환경으로 변환하는 제어 접근법을 제안한다. 도 7 은 위와 같은 접근법을 나타낸다. 여기에서 S 는 라플라스 오퍼레이터(미분)을 나타내고, τ 는 양의 게인(non-negative gain)을 나타낸다. 제안된 접근법에 따르면, 시간에 대한 힘(f_d)과 속도($\dot{x}_d$) 곱을 나타내는 공급률의 통합(supply rate integration)의 유한한 하단의 경계가 존재한다. 이것은 시스템이 소모적이고 입력 상태 안정화(ISS)를 만족하기 위한 충분 조건이 된다.

[0056] 정리(theorem) 3.1: $x_d \mapsto f_d$ 와 같은 외부 환경(VE)에서, 만약 $\exists \mu_{\max} < \infty$ 를 만족하는 조건에서 모든 시간에 대하여 $f'_d(x_d) < \mu_{\max}$ 를 만족한다면, 외부 환경은 도 7에서 정의된 피드백을 포함하여 소모적이고 입력 상태 안정화(ISS)하다.

[0057] 증명. 이산 영역(discrete domain)에서 시간에 대하여 부등식 통합을 통하여 수학적 6을 얻을 수 있다.

수학적 6

$$\sum_{k=1}^n f_d(n) \left(\dot{x}_d(n) - \frac{\dot{f}_d(n)}{\mu_{\max}} \right) \Delta t \geq 0$$

[0059] 위의 비평형성을 전개하면 수학적 7의 부등식을 얻는다.

수학적 7

$$\underbrace{\sum_{k=1}^n \left[f_d(k) \left(\dot{x}_d(k) - \frac{\dot{f}_d(k)}{\mu_{\max}} \right) \right]}_{E_1(n)} - \underbrace{\sum_{k=1}^n \left[f_d(k-1) \left(\dot{x}_d(k) - \frac{\dot{f}_d(k)}{\mu_{\max}} \right) \right]}_{E_{1b}(n)} \geq 0$$

[0061] $E_1(n)$ 에서 $E_{1b}(n)$ 을 뺀 차(subtraction)의 값은 한정적인 더 낮은 한계를 갖기 때문에, $E_{1b}(n)$ 와 $E_1(n)$ 은 유한한 낮은 한계를 갖는다고 결론지을 수 있다. 위의 증명을 위해 가정한 것들은 유한한 하단 값이 아니기 때문에, 수학적 7의 부등식은 반대되는 결과를 초래한다. 그러므로, $\exists \alpha_{1a}, \alpha_{1b} < \infty$ 이 되고, 수학적 8이 도출된다.

수학적 8

$$E_1(n) = \sum_{k=1}^n \left[f_e(k) \left(\dot{x}(k) - \frac{\dot{f}_e(k)}{\mu_{\max}} \right) \right] \geq -\alpha_{1a}$$

$$E_{1b}(n) = \sum_{k=1}^n \left[f_e(k-1) \left(\dot{x}(k) - \frac{\dot{f}_e(k)}{\mu_{\max}} \right) \right] \geq -\alpha_{1b}$$

수학식 2의 부등식에 기초하여, 수학식 8의 부등식은 1-포트 네트워크가 소모적일 수 있는 충분조건을 의미한다. 그림 7의 빨간 점선이 이를 나타낸다. 그러므로, 외부 환경(VE)은 $(VE : u \mapsto f_d)$ 소모적이고 입력 상태 안정화(ISS) 된다. 그러나, 이것은 제안된 제어 구조를 포함한 모든 시스템이 입력 상태 안정(ISS)하다는 것을 의미하지는 않는다. 수학식 8을 전개하면, 다음과 같은 수학식 9를 얻을 수 있다.

수학식 9

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^n \left[f_d(k) \left(\dot{x}_d(k) - \frac{\dot{f}_d(k)}{\mu_{\max}} \right) \right] \\ = \underbrace{\sum_{k=1}^n [f_d(k) \dot{x}_d(k)]}_{E_{2a}(n)} - \underbrace{\sum_{k=1}^n \left[f_d(k) \frac{\dot{f}_d(k)}{\mu_{\max}} \right]}_{E_{2b}(n)} \geq -\alpha_{1a} \end{aligned}$$

수학식 9의 부등식이 한정된 낮은 한계(finite lower bound) $(-\alpha_{1a})$ 를 갖기 때문에, $E_1(n)$ 에 같은 분석을 적용하면, $E_{2a}(n)$ 와 $E_{2b}(n)$ 도 역시 수학식 10과 같은 한정된 낮은 한계를 갖는다고 볼 수 있다.

수학식 10

$$\sum_{k=1}^n [f_d(k) \dot{x}_d(k)] \geq -\alpha_{2a}$$

$$\sum_{k=1}^n \left[f_d(k) \frac{\dot{f}_d(k)}{\mu_{\max}} \right] \geq -\alpha_{2b}$$

한편, 수학식 6의 부등식을 전개하면 다음을 얻을 수 있다.

$$\underbrace{\sum_{k=1}^n [f_d(k) \dot{x}_d(k)]}_{E_{R1}} - \underbrace{\sum_{k=1}^n \left[\frac{\dot{f}_d^2(k)}{\mu_{\max}} \right]}_{E_{R2}} \geq 0$$

E_{R1} 과 E_{R2} 의 차(subtraction)가 한정된 낮은 한계(finite lower bound)를 갖기 때문에, α_{R1} 와 α_{R2} 와 같은 한정된 낮은 한계(finite lower bound)를 각각 갖는다고 볼 수 있다.

수학식 11

$$E_{R1} = \sum_{k=1}^n \left[\dot{f}_d(k) \dot{x}_d(t) \right] \geq -\alpha_{R1},$$

$$E_{R2} = \sum_{k=1}^n \left[\frac{\dot{f}_d^2(k)}{\mu_{\max}} \right] \geq -\alpha_{R2}$$

[0071]

[0072] 수학식 10과 수학식 11의 선형 조합으로 다음 수학식 12를 얻을 수 있다.

수학식 12

$$\sum_{k=1}^n \left[\dot{x}_d(t) \left(\tau \dot{f}_d(k) + f_d(k) \right) \right] \geq -\alpha_R$$

[0073]

[0074] 여기서, $\alpha_R = \tau \alpha_{R1} + \alpha_{R2}$ 이다.

[0075] 수학식 12의 부등식(inequality)은 도 7의 포트 2가 수학식 2 및 정리(theorem) 2.2에 기반하여 소모적이 되기

위한 충분 조건으로서 고려될 수 있다. 결과적으로, 전체 시스템($VE : x_d \rightarrow (f_d + \tau \dot{f}_d)$)은 정리(theorem) 2.1에 기반하여 입력 상태 안정화(ISS) 되었다고 볼 수 있다.

[0076] $\mu_{\max}$ 를 포함하는 피드백 경로는 전체 시스템의 입력 상태 안정화를 보장하더라도, 한정된 범위에서의 진동은 생길 수 있다. 한정된 범위에서의 진동의 진폭은 $\mu_{\max}$ 의 크기와 직접적인 관련성을 갖는다. 한정된 범위일지라도 진동이 존재한다는 것은 사용자의 입장에서 기분 좋은 일이 아니다. 수학식 11에 나타난 바와 같이, 소비적인 피드포워드(feedforward) 연결($\tau \geq 0$)은 한정된 진동(bounded oscillation)을 제어하기 위해 도입될 수 있다. 이러한 피드포워드 연결 함수는 댐핑(damping)과 유사하며, 한정된 진동(bounded oscillation)을 효과적으로 제거할 수 있다.

[0077] 본 발명에서는 수학식 2와 같은 미리 정해진 더 낮은 한계(lower bound)를 설정할 필요가 없으나, 더 낮은 한계(lower bound)의 존재(existence)를 보장하고, 초기 에너지 스토리지보다 큰, 시스템으로부터 추출될 수 있는 에너지의 한정된(finite) 양을 허용한다. 그러므로, 제안된 접근방법은 수동성에 기반한 접근방법에 비하여 덜 보수적이다.

[0078] 종래의 전형적인 한정 접근 방식(boundedness approach)와 달리, 피드백의 이득($\mu_{\max}$)은 온라인 또는 오프라인상에서 $\Delta f_d(n) / \Delta x_d(n)$ 의 상한(upper bound)으로 산출될 수 있으며, 이는 오퍼레이터에 의해 조절될 필요가 없다. 더불어, 온라인상에서 피드백 이득($\mu_{\max}$)은 다음과 같이 산출될 수 있다.

$$\mu_{\max} = \max \left\{ \frac{f_d(n) - f_d(n-1)}{x_d(n) - x_d(n-1)} \right\}_{k=1, \dots, n}$$

[0079]

[0080] 그러므로, 각각의 외부 환경(VE)에 의해서 수동 조절될 필요도 없다.

[0081] 4. 멀티 DOF 햅틱 인터랙션을 위한 입력 상태 안정화(ISS) 접근방법

[0082] 외부 환경(VE) 렌더링 알고리즘에 독립적으로 멀티-DoF 햅틱 인터랙션을 위한 입력 상태 안정화 접근법(ISS approach)의 적용을 일반화하기 위해서, 기본적인 1-포트 입력 상태 안정화 접근법(ISS approach)을 확장하여

2-포트 입력 상태 안정화 접근법을 적용한다.

- [0083] 외부 환경의 힘/토크(force/torque) 시뮬레이션을 계산하기 위해서는, 멀티-DOF 가상 프록시(Virtual Proxy, VP)가 이용될 수 있는데, 멀티-DOF 가상 프록시는 도 8에서 보듯이 외부 환경의 경계(boundary)를 따라 움직이는 질량이 없는 구(massless sphere)이다.
- [0084] 가상 프록시가 이용되면, 멀티-DOF 인터랙션 문제는 멀티 독립 인터랙션 문제점은 각각의 축 상에 디커플링(decoupled)될 수 있다.
- [0085] 가상 프록시(VP)가 각각의 축 상에 디커플링 되면, 프록시가 햅틱 인터랙션 포인트(HIP)의 표면을 따라 이동하기 때문에, 인터랙션 문제는 견고한 가상 환경(VP)의 인터랙션에서 움직이는 가상 물체의 인터랙션으로 변화될 수 있다. 도 9에 도시된 바와 같이 각각의 DoF에서 스프링(spring)과 댐퍼(damper)와 같은 움직이는 가상 물체는 단순한 질량 없는 관성을 가지는 시스템으로 모델링 될 수 있다.
- [0086] 일단(one end)이 이산 인터페이스(30)에 상호 연결되고, 나머지 단(the other end)은 이동 관성(moving inertia)에 상호 연관되며, 제한(constrained)받지 않는다. K_e 와 B_e 는 각각 스티프니스(stiffness)와 댐핑 이득(damping gains)을 나타낸다. M_e 는 이동 물체에 대한 관성 매트릭스(inertia matrix)를 나타내고 x_e 는 이동하는 질량 없는 관성에 대한 위치를 나타낸다.
- [0087] 도 10은 본 발명의 일 실시예에 따른 위치 vs. 힘의 응답과 위치 응답을 나타내는 그래프이다.
- [0088] 제안된 입력 상태 안정화 접근법(ISS approach)을 구현하기 위하여, 시스템의 입력 vs. 출력 관계는 도 10에 나타난 바와 같이 반시계 방향의 히스테리시스 비선형성을 나타내야 한다.
- [0089] 도 10(a)는 움직이는 가상 물체에 대한 x-축 위치와 힘 간의 응답을 나타낸다. 작동자가 움직이는 가상 물체를 밀어내는 반면에, 햅틱 디바이스의 위치는 증가하고, 이에 따라 인터랙션 힘도 증가한다. 일단 움직이는 가상 물체가 움직이기 시작하면, 햅틱 디바이스와 가상 물체간의 오류(error)는 감소한다. 이러한 시나리오에서, 햅틱 디바이스의 위치가 증가할지라도, 인터랙션 힘은 점차적으로 감소하게 된다. 작동자가 방향을 바꾸어서 햅틱 프로브(probe)를 풀어주게 되면, 인터랙션 힘과 함께 햅틱 인터랙션 포인트(HIP)의 위치는 감소하게 된다. 결국, 햅틱 프로브(probe)가 원래의 위치로 되돌아오면, 위치와 힘에 대한 응답은 수동적 폐루프 체인(passive closed-loop chain)을 형성하게 된다. 이것은 풀어주는 경로가 눌러주는 경로보다 낮다는 것을 의미한다. 시계 방향 히스테리시스 행동에 대한 위치와 힘 간의 그래프는 아래와 같이, 시스템의 생성된 에너지는 낮은 한계를 갖는다는 것을 나타낸다.

$$\int_0^T f_{d_x}(t) \cdot \dot{x}_d(t) dt \geq 0$$

- [0090]
- [0091] 생성된 에너지가 한정적이고, 시스템이 입력 상태 안정(ISS)하다고 보일 지라도, 인터랙션은 도 10에 도시된 바와 같이 불안정하다. 이것은 반시계 방향 히스테리시스 비선형성을 가지는 시스템에서 움직이는 가상 물체의 인터랙션을 가정하는 것이 적절한 가정이 아닐 수 있다는 것을 의미하며, 이는 시스템의 입력-출력 행동이 추출된 에너지가 유한한 값에 한정되는 시계 방향 히스테리시스 행동을 나타내기 때문이다.
- [0092] 그러므로 1-포트 입력 상태 안정화 접근법(ISS approach)은 움직이는 가상물체를 포함하는 외부 환경(VE)에 직접 적용될 수 없다. 첫 번째 단계는 시스템의 불안정한 행동이 허용되는 이유를 설명할 수 있는 시스템에 대한 반시계 방향 히스테리시스 행동을 결정하는 것이다.
- [0093] A. 움직이는 가상 물체의 인터랙션에 대한 히스테리시스 비선형성 찾기
- [0094] 움직이는 가상 물체의 인터랙션에 대해 불안정한 행동을 야기시키는 반시계 방향 히스테리시스 비선형 컴포넌트에 대해 검토한다. 전기 기계 분석을 적용하면 도 11에 나타난 바와 같이 움직이는 관성체를 스프링과 댐퍼로 분리할 수 있다. 그러므로, 도 4는 도 12와 같이 새롭게 표현될 수 있다. 새로운 표현에 따르면, 가상 환경(VE)는 2개의 파트로 분리될 수 있다. 스프링과 댐퍼로 구성된 2-포트 햅틱 컨트롤러와 움직이는 관성체이다.
- [0095] 시스템의 각 구성요소가 소모적이고, 한정된 양의 에너지를 생산한다면, 전체 시스템은 소모적이고, 시스템에서 생성되는 에너지도 한정적이다. 그러므로, 전체 시스템은 입력 상태 안정(ISS)하다. 작동자와 햅틱 디바이스는

원초적으로 소모적인 구성요소이다. 이것은 소모적인 구성요소로 질량 없는 가상의 움직이는 관성체를 고려하는 것을 가능하게 한다. 그리하여 소모적이지 않고 한정되지 않은 에너지를 생성하는 유일하게 남은 구성요소는 이상 인터페이스와 햅틱 컨트롤러가 포함된 2-포트 네트워크이다. 2-포트 네트워크로부터 생성된 에너지가 한정적 이게 할 수 있다면, 모든 시스템은 소모적이고, 입력 상태 안정(ISS)하다고 결론지을 수 있다.

[0096] 수학적으로, 이러한 2-포트 네트워크의 순 에너지(net energy)는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{Energy} &\cong \int_0^t f_{d_x}(t) \dot{x}_d(t) dt - \int_0^t f_{d_x}(t) \dot{x}_e(t) dt \\ &= \int_0^t f_{d_x}(t) (\dot{x}_d(t) - \dot{x}_e(t)) dt \\ &= \int_0^t f_{d_x}(t) \dot{e}_x(t) dt \end{aligned}$$

[0097]

여기에서, $\dot{e}_x(t) = \dot{x}_d(t) - \dot{x}_e(t)$ 이다.

[0098]

수학식 2의 부등식에 나타난 소모성 조건과 비교하면, 차이점은 2-포트 네트워크의 에너지 표현은 위치 자체 대신에 위치 오류(error)를 사용하고 있다는 점이다. 도 10에 나타난 동일한 데이터를 도 13에서는 위치 오류와 힘 간의 그래프의 형태로 나타내고 있다. 도 10과 달리, 도 13은 생성된 에너지에 대한 반시계 방향의 히스테리시스 비선형 행동을 표현하고 있으며, 이것은 인터액션이 왜 불안정한지를 설명하고 있다. 그러므로, 1-포트 입력 상태 안정 접근법(ISS approach)의 2-포트로의 확장 필요성은 이산 인터페이스와 햅틱 컨트롤러 2-포트 네트워크 소모성 및 입력 상태 안정화(ISS)로 나타낼 수 있다.

[0100] B. 입력 상태 안정 접근법(ISS approach)의 2-포트로의 확장

2-포트 햅틱 컨트롤러 입력 상태 안정화(ISS)를 만드는 방법을 설명한다.

[0101]

2-포트 햅틱 컨트롤러의 입력과 출력은 도 15에 나타난 바와 같다. 멀티-DoF(m -DoF) 가상환경(VE)에서, X_d , X_e 및 F_d 는 x_d, x_e 및 f_d 의 m X1의 벡터 형태로 각각 표현된다. 햅틱 디바이스의 상태($X_d(n)$)는 컨트롤러의 기준 신호로 고려될 수 있고, 오류 벡터(error vector)는 다음과 같이 정의된다.

$$E(n) = X_d(n) - X_e(n)$$

[0103]

도 13에 도시된 바와 같이, 입력 오류와 출력 힘을 가지는 히스테리시스 비선형성의 시스템의 햅틱 컨트롤러를 고려했기 때문에, 수학식 4의 부등식처럼, 히스테리시스 시스템의 부분 한정성 성질(sector boundedness property)은 다음과 같이 다시 정리할 수 있다.

수학식 13

$$\dot{F}_{d_i}(n) \dot{E}_i(n) - M_{\max}^{-1} \dot{F}_{d_i}^2(n) \geq 0, \quad i = 1, \dots, m,$$

[0105]

여기에서, $M_{\max}$ 는 멀티-DoF(m -DoF) 가상환경(VE)에 대한 각 축(axis)의 $\mu_{\max}$ 에 대한 대각 매트릭스(diagonal matrix)이다.

[0106]

수학식 3의 부분 한정성 성질(sector boundedness property)로부터 수학식 8과 12에서 소모성 조건을 도출할 수 있으며, 도 14(b)에서 각각의 신호를 조정한다면 동일한 소모성 조건을 도출할 수 있다. 이러한 구성은 추출되는 에너지의 최대치가 유한하게 낮은 한계를 갖는다는 것을 보장할 수 있고, 이것은 도 12와같이 2-포트 네트워크가 소모적이기 위한 충분한 조건이다. 그러므로, 도 12에 나타난 모든 시스템 구성요소는 소모적일 수 있고, 결론적으로, 멀티-DoF(m -DoF) 인터액션은 입력 상태 안정(ISS)할 수 있다.

[0107]

[0108] 도 14(b)의 제시된 제어 구조(control architecture)는 소모적이고 입력 상태 안정(ISS)한 시스템을 만들 수 있을 지라도, 특정 렌더링 알고리즘(rendering algorithm)에서는 쉽게 접근 가능하지 않을 수 있으므로 가상 환경(VE)의 내부 제어 신호(internal control signal)를 조정할 필요가 있다. 렌더링 알고리즘으로부터 독립적인 2-포트 네트워크 입력 상태 안정 접근법(ISS approach)을 만들기 위하여, 입력($X_d(n)$)에 대한 조정 접근법을 가상 환경만이 내부 제어 신호에 접근 가능하도록 변환하는 것이 필요하다. 도 14(b)와 동일한 의미를 지니도록 도 14(c)에서 변환된 표현을 제시하고 있으며, 인터랙션 입력 상태 안정(ISS)을 만들 수 있도록 입력($X_d(n)$)을 변환할 수 있다. 다음의 수식은 동일한 의미를 지니는 변환이 가능한 방법을 설명하고 있다. 여기에서, $E(n)$ 과 $X_d(n)$ 는 변형되었으며, 햅틱 컨트롤러에 동일한 제어 입력인 $U(n)$ 을 인가하는 것으로 귀결된다.

$$U(n) = E(n) - M_{\max}^{-1}F_d(n) \\ = (X_d(n) - M_{\max}^{-1}F_d(n)) - X_e(n)$$

[0109] 도 16은 본 발명의 일 실시예에 따른 상태 안정화를 위한 입출력 제어 시스템의 구성도이다.

[0111] 도 16의 본 발명의 일 실시예에 따르면, 상태 안정화를 위한 입출력 제어 시스템(100)은 입력(x) 및 변환값을 제공하는 입력 모듈(110); 출력(f)을 제공받는 출력 모듈(120); 상기 출력 모듈에서 제공받은 출력(f)에 변환

식($\frac{1}{\mu_{\max}}$)을 적용하여 상기 변환값을 산출하고, 상기 변환값을 상기 입력 모듈에 제공하는 변환 모듈(130); 및 상기 입력 모듈로부터 상기 입력(x) 및 상기 변환값을 제공받고, 상기 출력(f)을 상기 출력 모듈로 제공하는 단말(140);을 포함하여 구성되며,

$$\mu_{\max} \geq \max \left\{ \frac{\Delta f}{\Delta x} \right\}$$

인 것일 수 있다.

[0112] 즉, 시스템의 안정화를 구현하기 위하여, 출력(f)에 변환식($\frac{1}{\mu_{\max}}$)을 적용하여 산출한 변환값을 입력 모듈(110)에 제공한 후, 입력 모듈(110)은 단말(140)로 입력(x) 및 변환값을 제공하는 경우에 시스템은 안정하게 구현될 수 있다는 것이다.

[0113] 더불어, 본 발명의 일 실시예에 따르면, 상태 안정화를 위한 입출력 제어 시스템(100)은 상기 출력 모듈(120)의 출력(f)에 추가적인 감쇠를 위한 감쇠 모듈(150)을 더 포함하는 것일 수 있다.

[0114] 이것은 출력(f)의 크기를 조절하기 위하여 추가적인 감쇠가 필요한 경우에만 적용할 수 있는 것으로, 상기 감쇠 모듈(150)의 적용 여부는 구현하고자 하는 시스템의 성질에 따르는 것이다.

[0115] 또한, 본 발명의 일 실시예에 따르면, 상태 안정화를 위한 입출력 제어 시스템(100)은 상기 변환 모듈에서 상기 입력 모듈에 제공한 변환값에 대하여 제공 시간을 조정하는 시간 조정 모듈을 더 포함하는 것일 수 있다.

[0116] 즉, 시간 조정 모듈은 입력(x)과 출력(f) 사이에 일정한 시간 지연이 있는 경우에는 일정한 시간 지연에 맞는 시간 조정을 통하여 상기 변환값을 입력 모듈에 제공할 수 있는 것이다. 더불어, 시간 지연이 없는 경우에는 시간 조정 모듈의 구성을 생략할 수도 있을 것이다.

[0117] 도 17은 본 발명의 다른 실시예에 따른 상태 안정화를 위한 입출력 제어 시스템의 구성도이다.

[0118] 본 발명의 다른 실시예에 따른 상태 안정화를 위한 입출력 제어 시스템(200)에 따르면, 복수의 입력(x)이 존재하고 단일의 출력(f)이 존재하는 시스템을 상정할 수 있으며, 이 경우에도 변환 모듈(230)로부터의 변환값을 경로1에 해당하도록 입력 모듈(210)에 제공하는 경우에도 상태 안정화를 구현할 수 있고, 경로2에 해당하도록 입력1 및 입력2 중 어느 하나에만 변환값을 제공하여도 상태 안정화를 구현할 수 있다는 것이다.

- [0119] 즉, 상기 변환 모듈(230)로부터의 변환값을 복수의 입력 중 어느 하나에만 적용하여도 상태 안정화를 구현할 수 있고, 상기 변환 모듈(230)로부터의 변환값을 복수의 입력이 합해진 결과에 적용하여도 상태 안정화를 구현할 수 있다는 것이다. 이것은 향후 구현에 있어서 다양한 형태로 구현할 수 있도록 구성의 자유도를 현저하게 증가하게 해준다.
- [0120] 도 18은 본 발명의 또 다른 실시예에 따른 상태 안정화를 위한 입출력 제어 시스템의 구성도이다.
- [0121] 본 발명의 또 다른 실시예에 따른 상태 안정화를 위한 입출력 제어 시스템(300)에 따르면, 상기 입력 모듈(310)은 복수의 입력을 제공하고, 상기 출력 모듈(320)은 복수의 출력을 제공받는 경우에 있어서, 상기 변환 모듈(330)은 상기 복수의 출력 중에서 적어도 하나의 출력을 이용하여 변환값을 산출하고, 상기 산출된 변환값을 상기 입력 모듈에 제공하며, 상기 단말은 상기 입력 모듈로부터 복수의 입력 및 적어도 하나의 변환값을 제공받는 것일 수 있다.
- [0122] 즉, 복수의 입력 중 어느 하나에만 변환값을 제공하거나, 복수의 입력의 합에 변환값을 제공하는 것이 모두 가능하고, 더불어, 복수의 출력 중 어느 하나의 출력만을 이용하여 변환값 산출에 이용하는 것도 가능한 것이다.
- [0123] 그러므로, 시스템 구성에 있어서 복수의 출력 중 어느 하나만을 이용하여 변환값을 산출할 수 있고, 상기 변환값을 복수의 입력 중 어느 하나에만 적용하여 상태 안정화를 위한 입출력 시스템을 구현할 수 있을 것이다.
- [0124] 본 발명의 또 다른 실시예에 따른 상태 안정화를 위한 입출력 제어 시스템에 따르면, 입력(x) 및 변환값을 제공하는 입력 모듈; 출력(f)을 제공받는 출력 모듈; 상기 출력 모듈에서 제공받은 출력(f)에 변환식 ($\alpha \frac{1}{\mu_{\max}}$)을 적용하여 상기 변환값을 산출하고, 상기 변환값을 상기 입력 모듈에 제공하는 변환 모듈; 및 상기 입력 모듈로부터 상기 입력(x) 및 상기 변환값을 제공받고, 상기 출력(f)을 상기 출력 모듈로 제공하는 단말;을 포함하여 구성되며, α 는 상수이고,
$$\mu_{\max} \geq \max \left\{ \frac{\Delta f}{\Delta x} \right\}$$
인 것일 수 있다.
- [0125] 도 19와 같이 2개의 입력과 2개의 출력이 존재하는 시스템에서 아래의 수식 조건과 도 20이 만족된다면,
- [0126]
$$f_2(x_1, x_2) = \alpha f_1(x_1, x_2)$$
- [0127]
$$f_1(x_1, x_2) = f_1(g(x_1, x_2))$$
- [0128]
$$g(x_1, x_2) = \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2$$
- [0129] 알파(alpha)의 절대값이 1보다 작을 경우에는 도 21의 (a)와 같은 방법으로, 알파(alpha)의 절대값이 1보다 클 경우에는 도 21의 (b)와 같은 방법으로 시스템을 입력 상태 안정(ISS)하게 만들 수 있다.
- [0130] 이를 활용하면 도 22와 같은 원격조종로봇 시스템을 도 23의 (a) 및 (b)의 방법을 이용하여 입력 상태 안정(ISS)하게 만들 수 있다.
- [0131] 짧은 시간 지연이 존재하는 원격로봇시스템의 경우, 시간 지연이 발생하는 네트워크 부분을 도 24의 방법으로 입력 상태 안정(ISS)하게 만들 수 있다.
- [0132] 시간 지연의 양이 무시할 수 없을 정도로 길지만, 그 양이 일정한 경우에는 도 25와 같이 지연되어 출력될 출력값을 입력 상태 안정 관찰자(ISS observer)로 예측하여 네트워크 시스템을 입력 상태 안정(ISS)하게 만들 수 있다. 이때, 입력 상태 안정 관찰자(ISS observer)에서는 입력과 출력값 곱의 부호를 판단하여 K_x 및 K_f 게인의 부호를 아래 수식이 만족되도록 결정한다.

$$if \dot{x}_m \dot{x}_{md} \geq 0 \quad \dot{x}_m \dot{x}_{md} - \frac{\dot{x}_{md}^2}{\mu_{\max}} \geq 0$$

[0133]

$$if \dot{x}_m \dot{x}_{md} < 0 \quad \dot{x}_m \dot{x}_{md} + \frac{\dot{x}_{md}^2}{\mu_{\max d}} \geq 0$$

[0134]

[0135] 이상 실시예를 참조하여 설명하였지만, 해당 기술 분야의 숙련된 당업자는 하기의 특허청구범위에 기재된 본 발명의 사상 및 영역으로부터 벗어나지 않는 범위 내에서 본 발명을 다양하게 수정 및 변경시킬 수 있음을 이해할 수 있을 것이다.

부호의 설명

[0136]

100, 200, 300: 상태 안정화를 위한 입출력 시스템

110, 210, 310: 입력 모듈

120, 220, 320: 출력 모듈

130, 230, 330: 변환 모듈

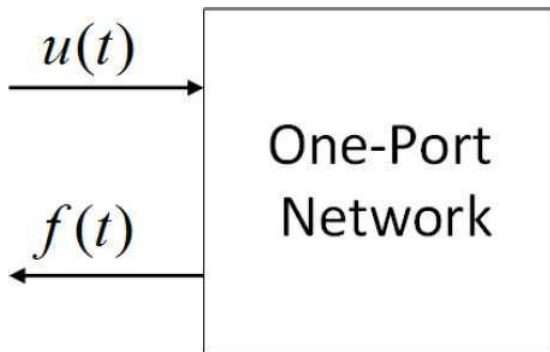
140, 240, 340: 단말

150, 250: 감쇠 모듈

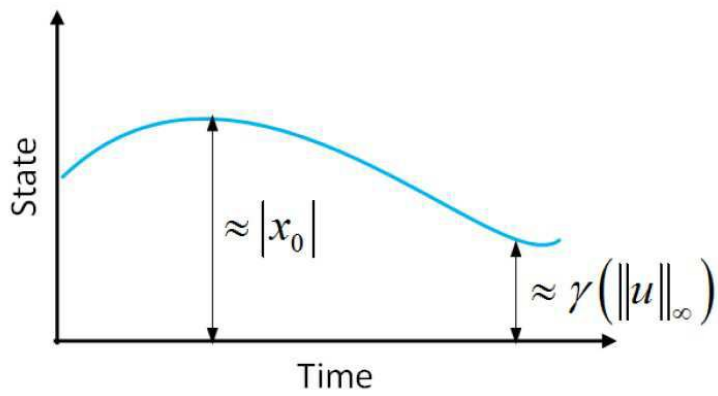
160: 시간 조정 모듈

도면

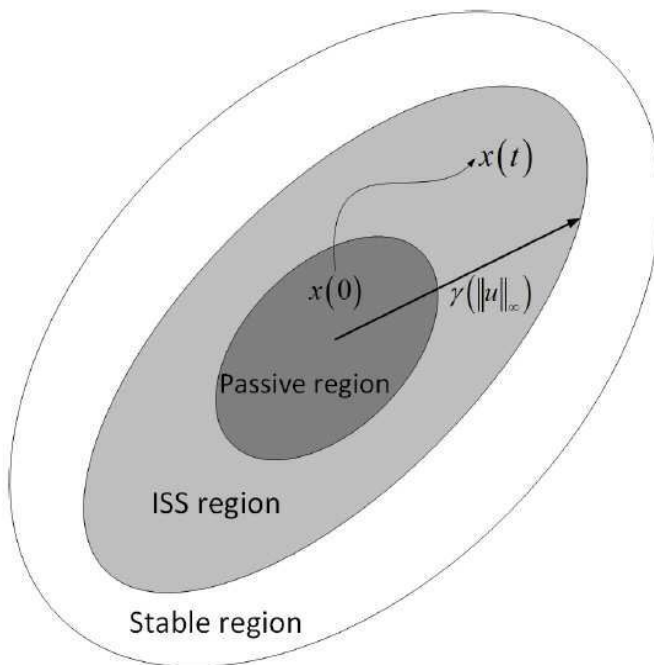
도면1



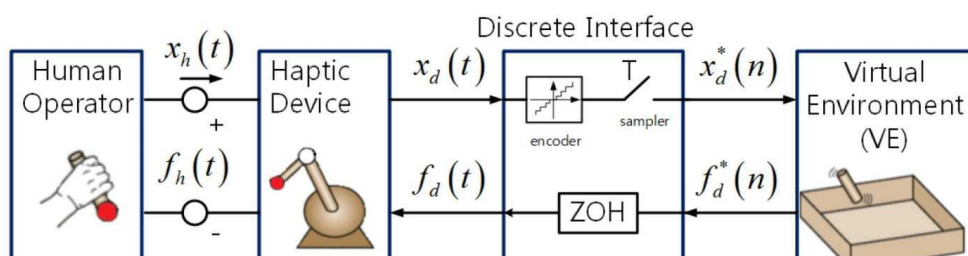
도면2



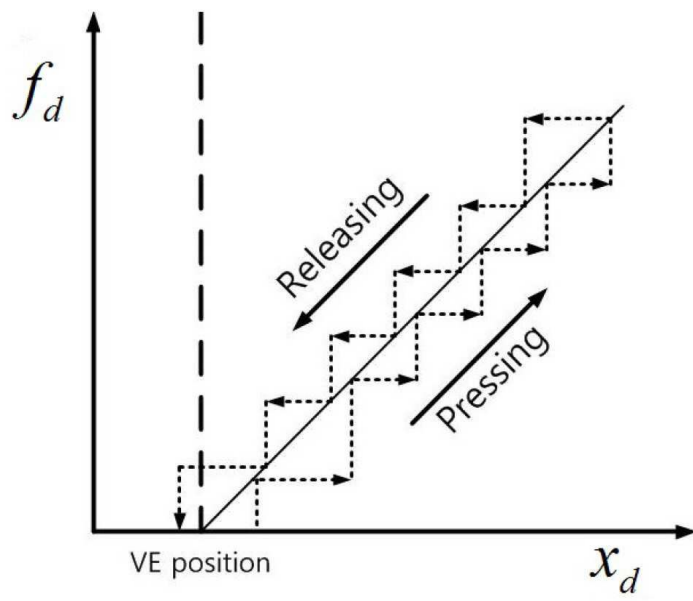
도면3



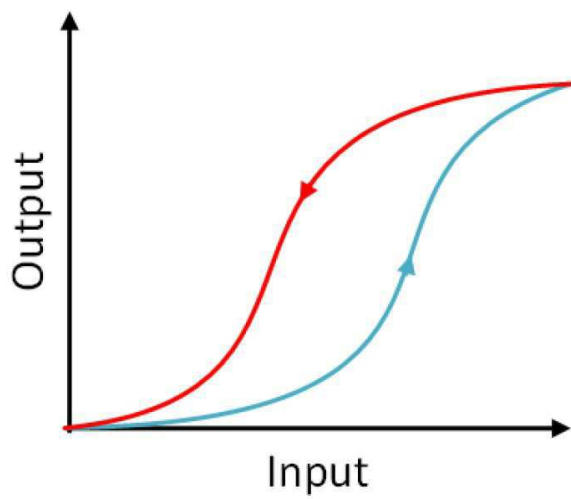
도면4



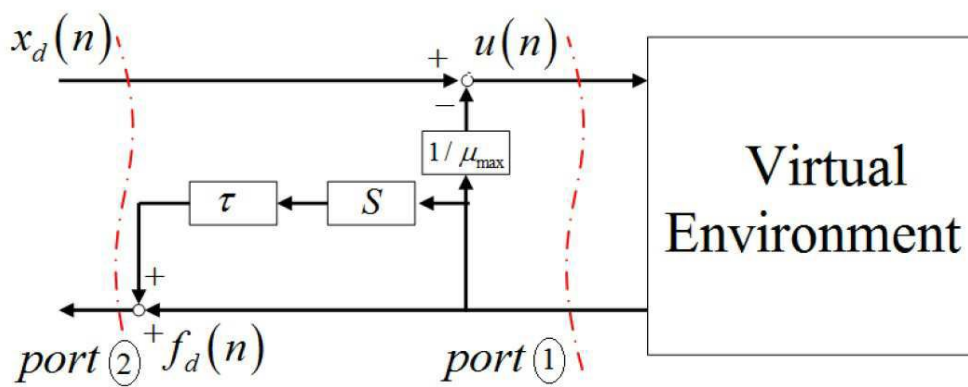
도면5



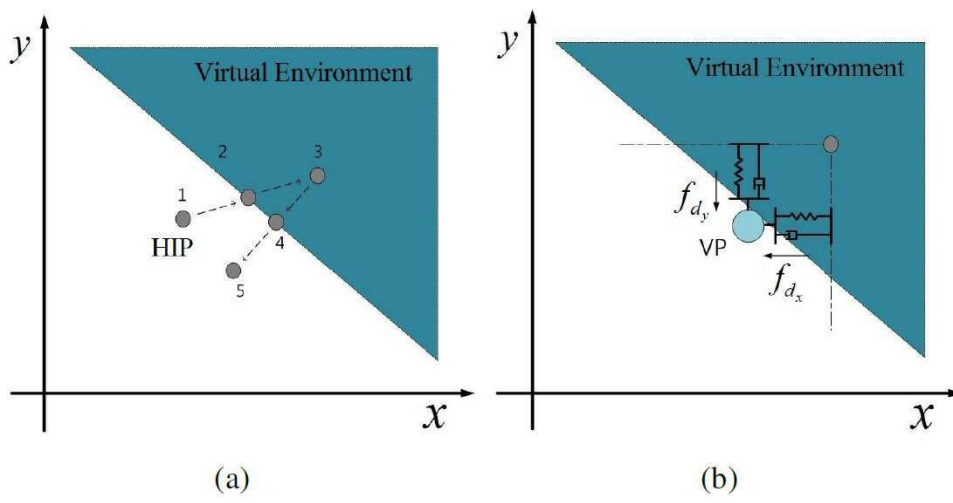
도면6



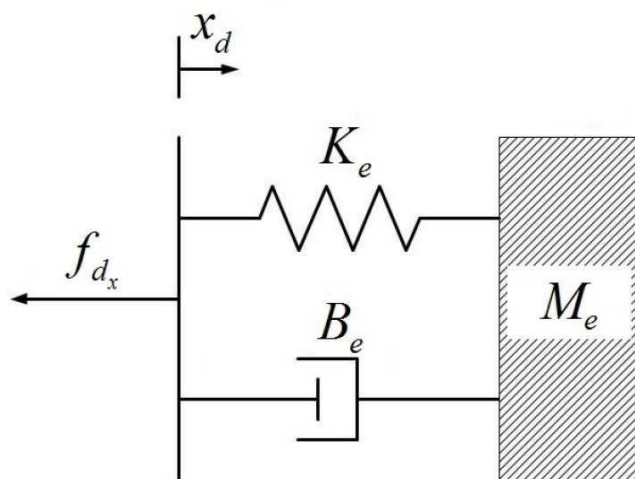
도면7



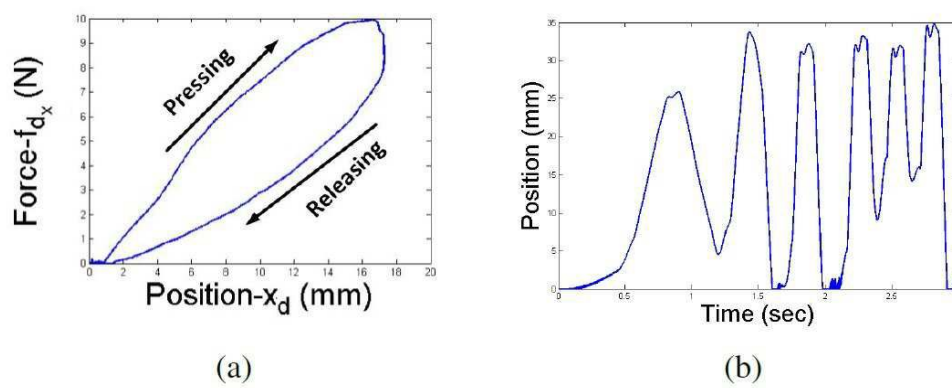
도면8



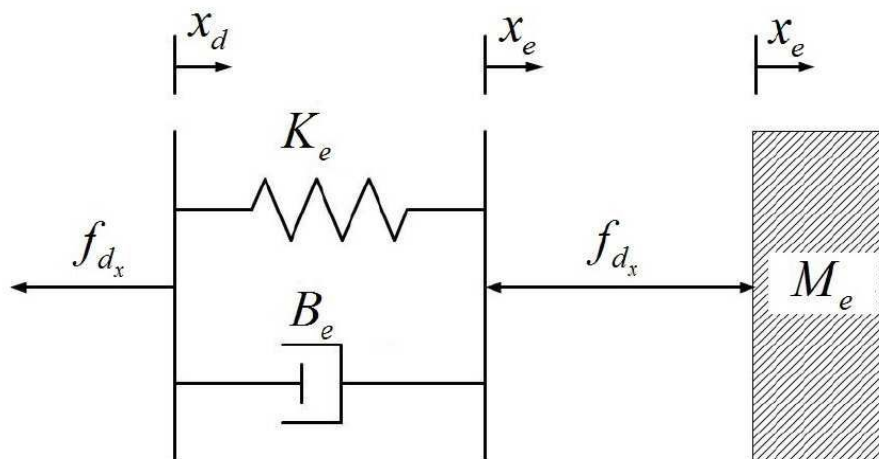
도면9



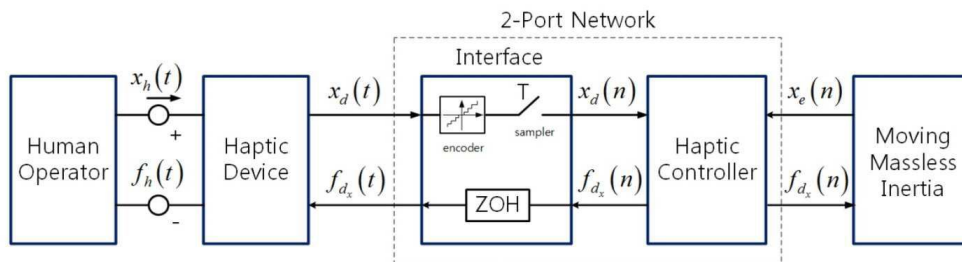
도면10



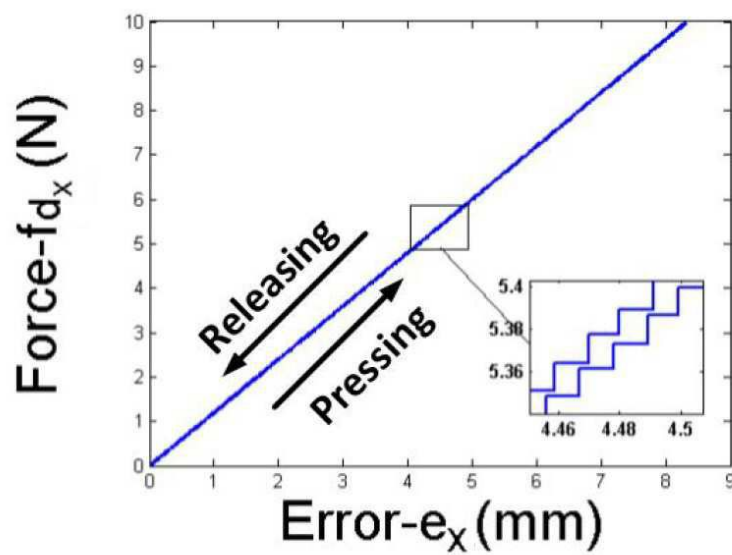
도면11



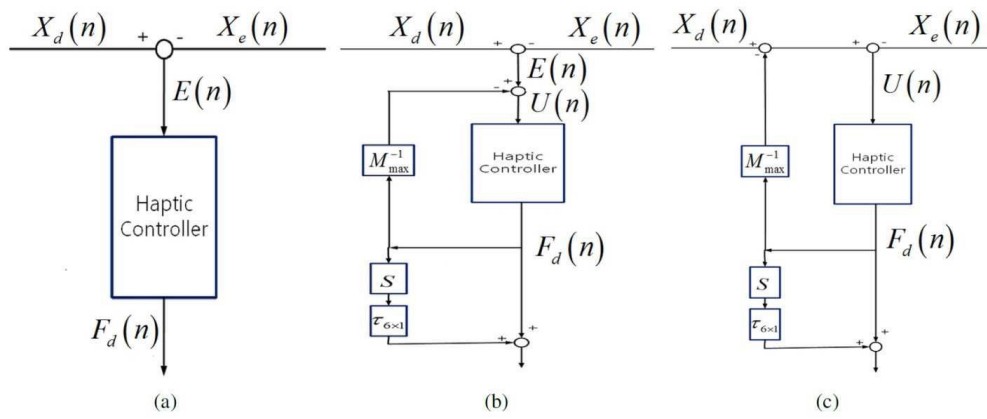
도면12



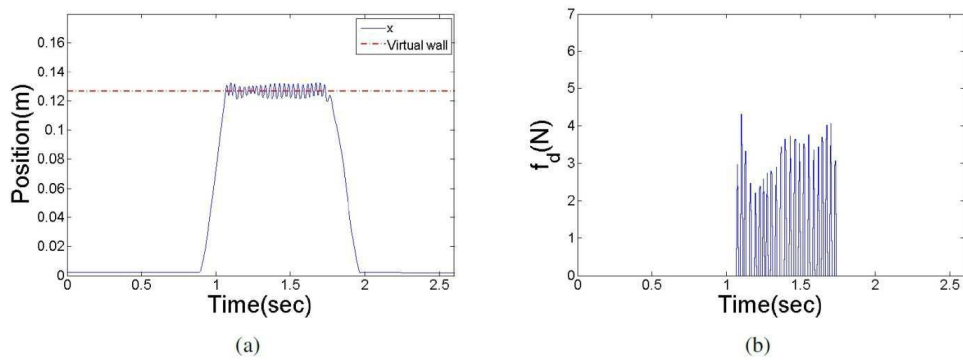
도면13



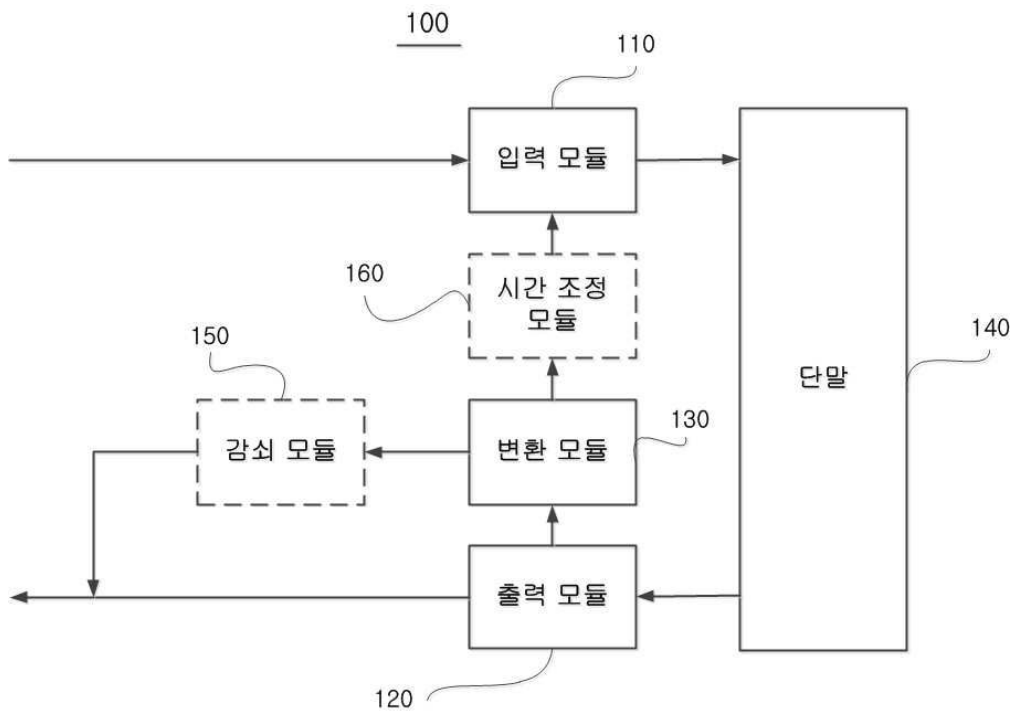
도면14



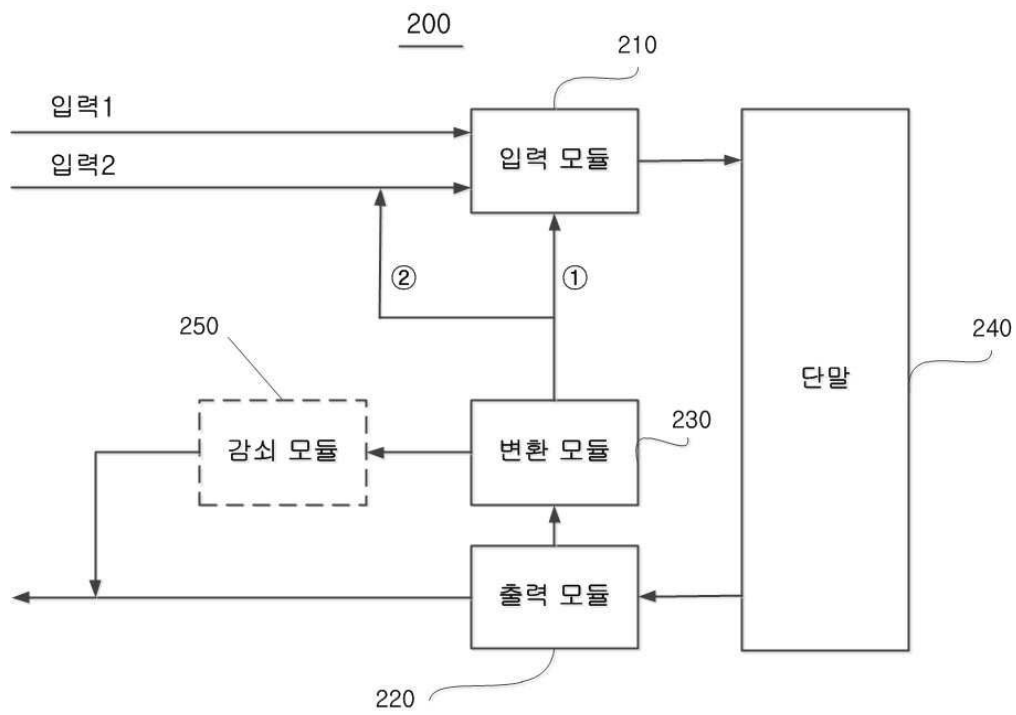
도면15



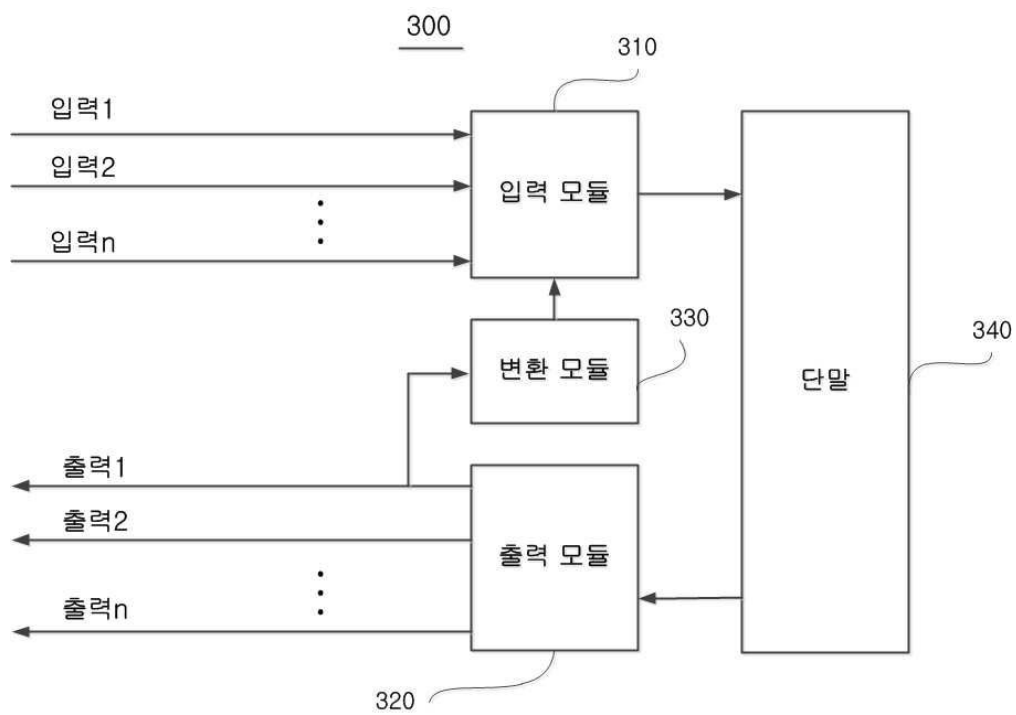
도면16



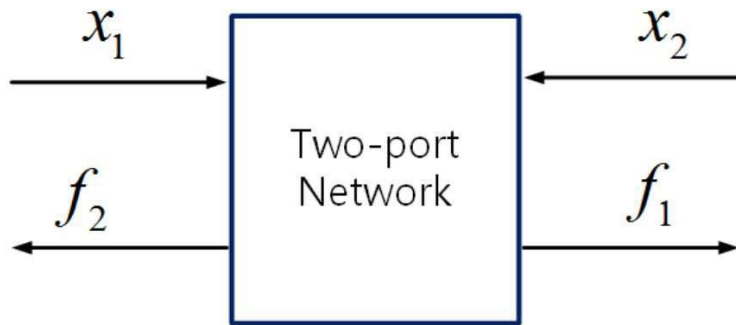
도면17



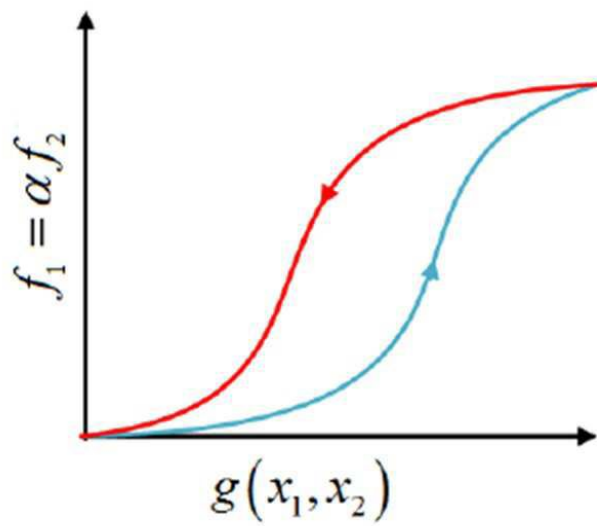
도면18



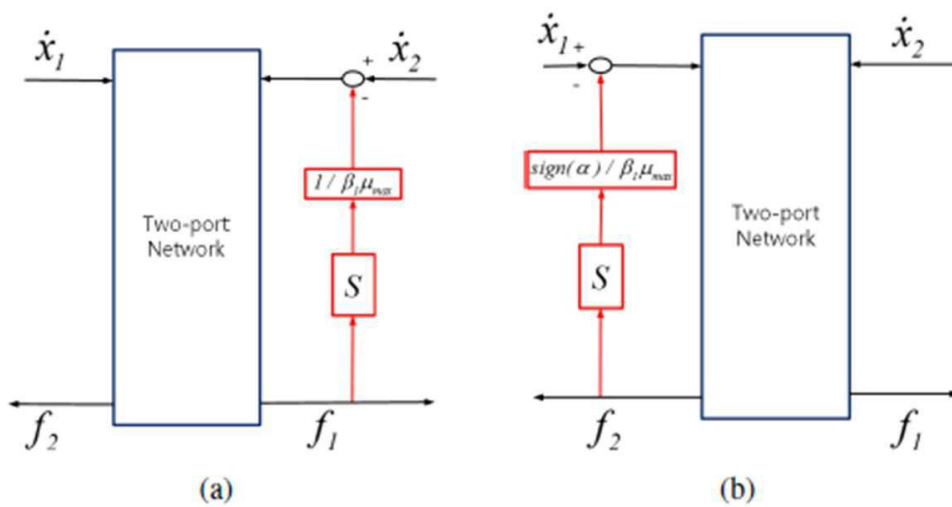
도면19



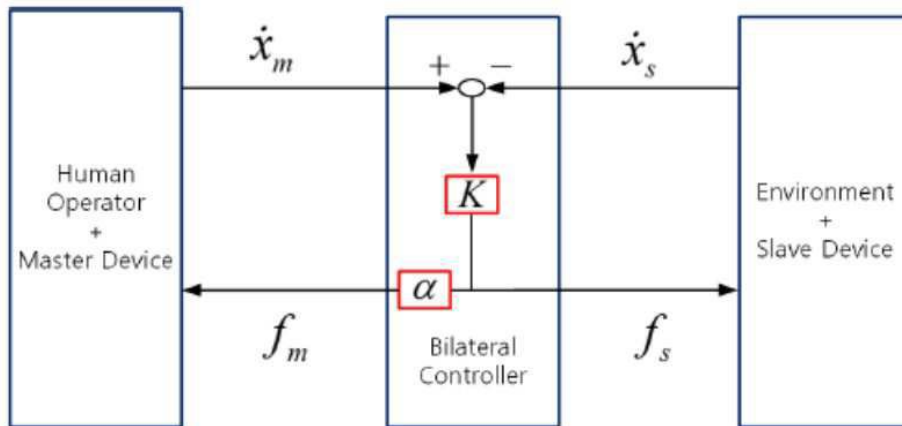
도면20



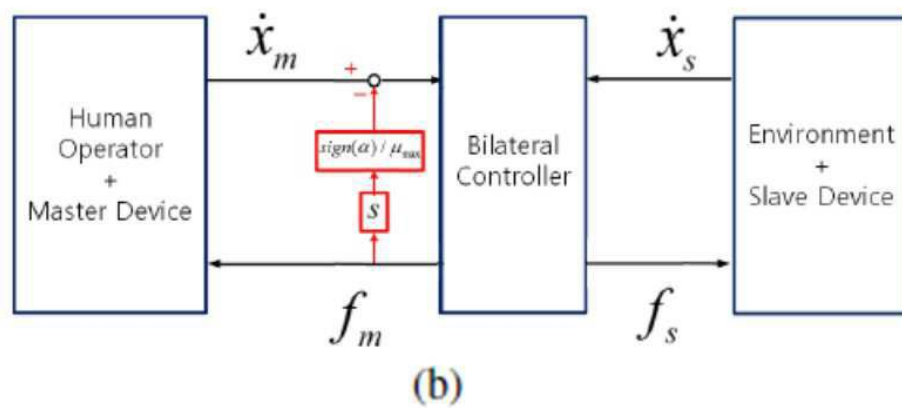
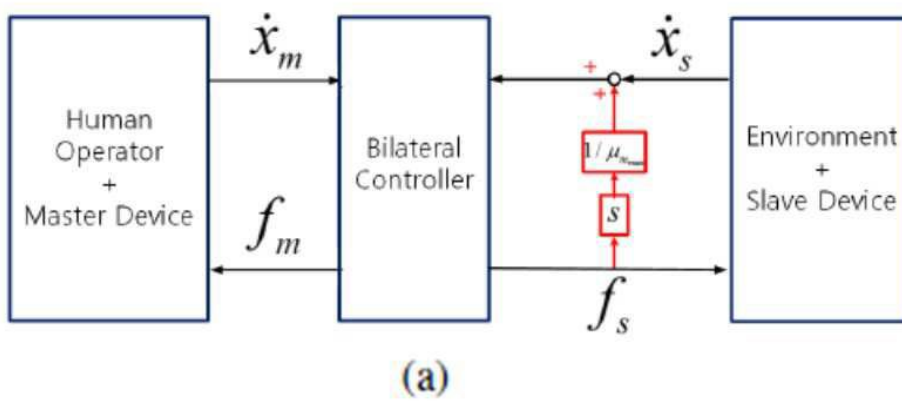
도면21



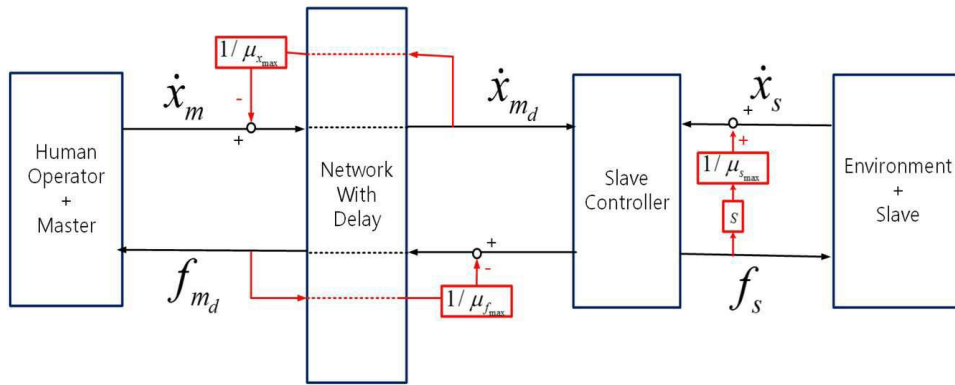
도면22



도면23



도면24



도면25

