



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2017-0081448
(43) 공개일자 2017년07월12일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
B25J 9/16 (2006.01) B25J 13/00 (2006.01)
G05B 19/02 (2006.01)
(52) CPC특허분류
B25J 9/1689 (2013.01)
B25J 13/006 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2016-0000513
(22) 출원일자 2016년01월04일
심사청구일자 2016년01월04일

(71) 출원인
한국기술교육대학교 산학협력단
충남 천안시 동남구 병천면 충절로 1600, 내 (한국기술교육대학교)
(72) 발명자
유지환
충청남도 천안시 동남구 병천면 충절로 1600 (한국기술교육대학교, 기계공학부)
오'말리, 마르시아
미국 77005-1892 텍사스 휴스턴 메인 스트리트 6100 디파트먼트 오브 메커니컬 엔지니어링 & 머터리얼스 사이언스 - 엠에스 321 라이스 유니버시티
차우다, 비나이
미국 77005-1892 텍사스 휴스턴 메인 스트리트 6100 디파트먼트 오브 메커니컬 엔지니어링 & 머터리얼스 사이언스 - 엠에스 321 라이스 유니버시티
(74) 대리인
특허법인 남앤드남

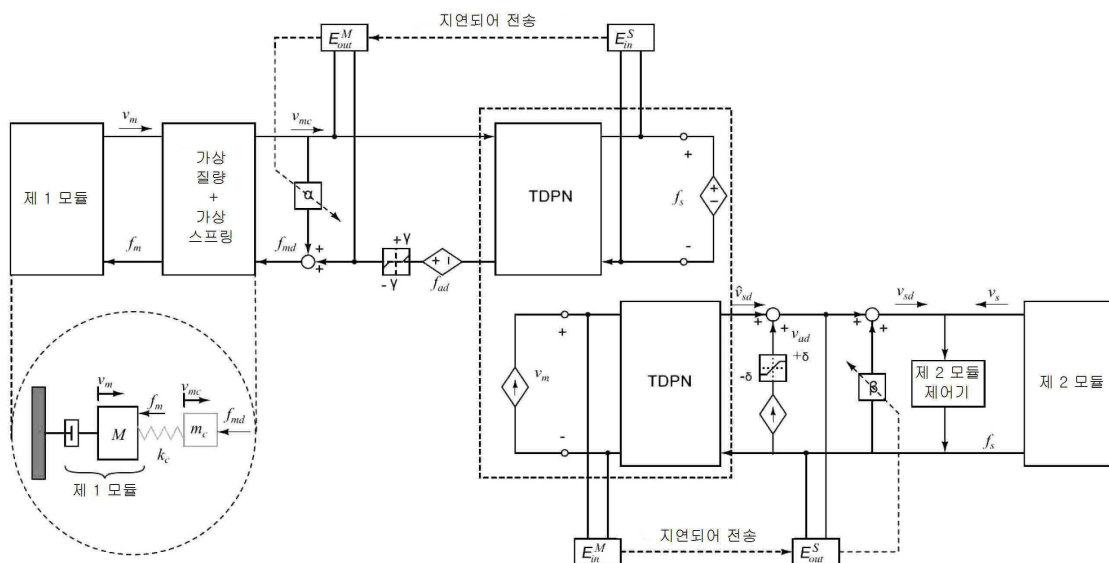
전체 청구항 수 : 총 20 항

(54) 발명의 명칭 시간 영역 수동성 기반 원격제어에서 성능을 향상시키기 위한 장치 및 방법

(57) 요약

본 발명은 시간 영역 수동성 기반 원격제어에서 성능을 향상시키기 위한 장치 및 방법에 관한 것으로서, 움직임에 대한 속도 신호를 생성하고, 상기 속도 신호를 제 2 모듈 측으로 전송하기 위한 제 1 모듈; 작용하는 힘을 나타내는 힘 신호를 생성하고, 상기 힘 신호를 상기 제 1 모듈 측으로 전송하기 위한 제 2 모듈; 및 상기 제 1 모듈과 상기 제 2 모듈 사이에 연결된 2 포트 네트워크 모듈을 포함하고, 상기 2 포트 네트워크 모듈은 상기 제 1 모듈 및 상기 제 2 모듈로 하여금 상기 속도 신호 또는 상기 힘 신호를 서로 교환하게 하는 것을 특징으로 한다.

대표도 - 도11



(52) CPC특허분류

B25J 9/1633 (2013.01)

B25J 9/1674 (2013.01)

G05B 19/02 (2013.01)

명세서

청구범위

청구항 1

시간 영역 수동성 기반 원격제어에서 성능을 향상시키기 위한 장치로서,

움직임에 대한 속도 신호를 생성하고, 상기 속도 신호를 제 2 모듈 측으로 전송하기 위한 제 1 모듈;

작용하는 힘을 나타내는 힘 신호를 생성하고, 상기 힘 신호를 상기 제 1 모듈 측으로 전송하기 위한 제 2 모듈; 및

상기 제 1 모듈과 상기 제 2 모듈 사이에 연결된 2 포트 네트워크 모듈

을 포함하고,

상기 2 포트 네트워크 모듈은 상기 제 1 모듈 및 상기 제 2 모듈로 하여금 상기 속도 신호 또는 상기 힘 신호를 서로 교환하게 하는,

시간 영역 수동성 기반 원격제어에서 성능을 향상시키기 위한 장치.

청구항 2

제 1 항에 있어서,

상기 제 2 모듈과 상기 2 포트 네트워크 모듈 사이에 연결된 추가 속도 신호 발생기를 더 포함하고,

상기 추가 속도 신호 발생기는, 상기 제 2 모듈에서 발생한 위치 오차를 보상하기 위해 속도 신호를 추가로 발생시키는 - 상기 제 2 모듈에서 발생한 위치 오차는 상기 제 1 모듈이 전송한 속도 신호와 상기 제 2 모듈이 수신한 속도 신호 사이의 차이에 의해 발생함 -,

시간 영역 수동성 기반 원격제어에서 성능을 향상시키기 위한 장치.

청구항 3

제 2 항에 있어서,

상기 추가 속도 신호 발생기는,

$$v_{ad}(k) = \frac{1}{\Delta T} \text{sat}_{\delta} \left(\hat{x}_{sd}(k) - \Delta T \sum_{j=0}^{k-1} v_{sd}(j) - \hat{v}_{sd}(k) \Delta T \right)$$

식에 의해 포화되고,

여기서, 상기 $v_{ad}(k)$ 는 상기 추가 속도 신호 발생기의 전류 값이며, 상기 ΔT 는 샘플링 시간이며, 상기

sat_{δ} 는 $\pm \delta$ ($\delta \geq 0$) 의 한계값을 갖는 포화 함수이며, 상기 $\hat{x}_{sd}(k)$ 는 상기 제 2 모듈에서 지연된

위치이며, 상기 $v_{sd}(j)$ 는 상기 제 2 모듈의 원하는 속도이며, 상기 $\hat{v}_{sd}(k)$ 는 상기 제 2 모듈에서 지연된 속도인,

시간 영역 수동성 기반 원격제어에서 성능을 향상시키기 위한 장치.

청구항 4

제 2 항에 있어서,

상기 2 포트 네트워크 모듈 및 상기 추가 속도 신호 발생기를 통한 에너지의 흐름을 실시간으로 모니터링하기 위해, 상기 제 2 모듈과 상기 추가 속도 신호 발생기 사이에 연결된 제 2 수동성 관찰기(Passivity Observer);

및

상기 제 2 수동성 관찰기에 기초하여 상기 2 포트 네트워크 모듈 및 상기 추가 속도 신호 발생기에서 생성된 에너지를 소모하도록 조절하기 위해, 상기 제 2 모듈과 상기 추가 속도 신호 발생기 사이에 연결된 제 2 수동성 제어기(Passivity Controller)

를 더 포함하는,

시간 영역 수동성 기반 원격제어에서 성능을 향상시키기 위한 장치.

청구항 5

제 4 항에 있어서,

상기 제 2 수동성 관찰기가 모니터링하는 에너지는,

식 $W_S(k) = E_{in}^M(k - T_f(k)) - E_{out}^S(k) + E_{PC}^S(k-1)$ 로 표현되고,

여기서, 상기 E_{PC}^S 는 상기 제 2 수동성 제어기에 의해 교정되는 에너지의 값이며,

상기 제 2 수동성 제어기에 의해 교정되는 에너지는,

식 $E_{PC}^S(k) = \Delta T \sum_{j=0}^k \beta(j) f_s^2(j)$ 로 표현되고,

$$\beta(k) = \begin{cases} 0 & \text{if } W^S(k) > 0 \\ -\frac{W^S(k)}{\Delta T f_s^2(k)} & \text{else, if } |f_s(k)| > 0 \end{cases}$$

여기서, 상기 $\beta(j)$ 는 식 로 표현되는,

시간 영역 수동성 기반 원격제어에서 성능을 향상시키기 위한 장치.

청구항 6

제 1 항에 있어서,

상기 제 1 모듈과 상기 2 포트 네트워크 모듈 사이에 연결된 추가 힘 신호 발생기를 더 포함하고,

상기 추가 힘 신호 발생기는, 상기 제 1 모듈에 피드백된 힘의 오차를 보상하기 위해 힘 신호를 추가로 발생시키는 - 상기 제 1 모듈에 피드백된 힘의 오차는 상기 제 2 모듈이 전송한 힘 신호와 상기 제 1 모듈이 수신한 힘 신호 사이의 차이에 의해 발생함 -,

시간 영역 수동성 기반 원격제어에서 성능을 향상시키기 위한 장치.

청구항 7

제 6 항에 있어서,

상기 추가 힘 신호 발생기는,

식 $f_{ad}(k) = \begin{cases} K_f(x_s(k - T_b) - x_m(k)), & \text{if } |x_s(k - T_b) - x_m(k)| > \gamma \\ 0, & \text{else} \end{cases}$ 에 의해 데드밴드(deadband)를 갖고,

여기서, 상기 $f_{ad}(k)$ 는 상기 추가 힘 신호 발생기의 전압 값이며, 상기 $x_s(k - T_b)$ 는 상기 제 2 모듈에서 지어진 위치이며, 상기 $x_m(k)$ 는 상기 제 1 모듈의 현재 위치이며, 상기 K_f 는 상기 $x_s(k - T_b)$ 와 상기

$x_m(k)$ 사이의 오차 상에서 적용되는 이득(gain)이며, 상기 $|x_s(k-T_b)-x_m(k)| > \gamma$ 는 상기 제 2 모듈이 원격 환경과 실제로 접촉했는지를 감지하기 위한 조건인,
시간 영역 수동성 기반 원격제어에서 성능을 향상시키기 위한 장치.

청구항 8

제 6 항에 있어서,

상기 2 포트 네트워크 모듈 및 상기 추가 힘 신호 발생기를 통한 에너지의 흐름을 실시간으로 모니터링하기 위해, 상기 제 1 모듈과 상기 추가 힘 신호 발생기 사이에 연결된 제 1 수동성 관찰기; 및

상기 제 1 수동성 관찰기에 기초하여 상기 2 포트 네트워크 모듈 및 상기 추가 힘 신호 발생기에서 생성된 에너지를 소모하도록 조절하기 위해, 상기 제 1 모듈과 상기 추가 힘 신호 발생기 사이에 연결된 제 1 수동성 제어기

를 더 포함하는,

시간 영역 수동성 기반 원격제어에서 성능을 향상시키기 위한 장치.

청구항 9

제 8 항에 있어서,

상기 제 1 수동성 관찰기가 모니터링하는 에너지는,

식 $W_M(k) = E_{in}^S(k-T_b(k)) - E_{out}^M(k) + E_{PC}^M(k-1)$ 로 표현되고,

여기서, 상기 E_{PC}^M 는 상기 제 1 수동성 제어기에 의해 교정되는 에너지의 값이며,

상기 제 1 수동성 제어기에 의해 교정되는 에너지는,

식 $E_{PC}^M(k) = \Delta T \sum_{j=0}^k \alpha(j) v_m^2(j)$ 로 표현되고,

여기서, 상기 $\alpha(j)$ 는 식
$$\alpha(k) = \begin{cases} 0 & \text{if } W^M(k) > 0 \\ -\frac{W^M(k)}{\Delta T v_m^2(k)} & \text{else, if } |v_m(k)| > 0 \end{cases}$$
 로 표현되는,

시간 영역 수동성 기반 원격제어에서 성능을 향상시키기 위한 장치.

청구항 10

제 1 항에 있어서,

상기 제 1 모듈 측에 연결된 가상 스프링 및 가상 질량을 더 포함하고,

상기 가상 스프링 및 가상 질량은,

상기 제 1 모듈에 작용하는 갑작스러운 힘의 변화를 완충하여, 상기 제 1 모듈에 저주파 성분을 전달하며, 그리고

상기 제 1 모듈에서 상기 제 2 모듈로 전송되는 속도 신호를 필터링하여, 상기 제 2 모듈에 저주파 성분을 전달하는,

시간 영역 수동성 기반 원격제어에서 성능을 향상시키기 위한 장치.

청구항 11

시간 영역 수동성 기반 원격제어에서 성능을 향상시키기 위한 방법으로서,

제 1 모듈 측에서, 움직임에 대한 속도 신호를 생성하는 단계;

상기 제 1 모듈 측에서, 상기 제 1 모듈과 제 2 모듈 사이에 연결된 2 포트 네트워크 모듈을 통해 상기 속도 신호를 상기 제 2 모듈 측으로 전송하는 단계;

상기 제 2 모듈 측에서, 작용하는 힘을 나타내는 힘 신호를 생성하는 단계; 및

상기 제 2 모듈 측에서, 상기 2 포트 네트워크 모듈을 통해 상기 힘 신호를 상기 제 1 모듈 측으로 전송하는 단계

를 포함하는,

시간 영역 수동성 기반 원격제어에서 성능을 향상시키기 위한 방법.

청구항 12

제 11 항에 있어서,

상기 제 1 모듈 측에서 상기 속도 신호를 상기 제 2 모듈 측으로 전송하는 단계 이후에, 그리고 상기 제 2 모듈 측에서 상기 힘 신호를 생성하는 단계 이전에,

상기 제 2 모듈과 상기 2 포트 네트워크 모듈 사이에 연결된 추가 속도 신호 발생기를 통해, 상기 제 2 모듈에서 발생한 위치 오차를 보상하기 위해 속도 신호를 추가로 발생시키는 단계를 더 포함하는 - 상기 제 2 모듈에서 발생한 위치 오차는 상기 제 1 모듈이 전송한 속도 신호와 상기 제 2 모듈이 수신한 속도 신호 사이의 차이에 의해 발생함 -,

시간 영역 수동성 기반 원격제어에서 성능을 향상시키기 위한 방법.

청구항 13

제 12 항에 있어서,

상기 추가 속도 신호 발생기는,

$$v_{ad}(k) = \frac{1}{\Delta T} \text{sat}_{\delta} \left(\hat{x}_{sd}(k) - \Delta T \sum_{j=0}^{k-1} v_{sd}(j) - \hat{v}_{sd}(k) \Delta T \right)$$

식 에 의해 포화되고,

여기서, 상기 $v_{ad}(k)$ 는 상기 추가 속도 신호 발생기의 전류 값이며, 상기 ΔT 는 샘플링 시간이며, 상기

sat_{δ} 는 $\pm \delta$ ($\delta \geq 0$) 의 한계값을 갖는 포화 함수이며, 상기 $\hat{x}_{sd}(k)$ 는 상기 제 2 모듈에서 지연된

위치이며, 상기 $v_{sd}(j)$ 는 상기 제 2 모듈의 원하는 속도이며, 상기 $\hat{v}_{sd}(k)$ 는 상기 제 2 모듈에서 지연된 속도인,

시간 영역 수동성 기반 원격제어에서 성능을 향상시키기 위한 방법.

청구항 14

제 12 항에 있어서,

상기 속도 신호를 추가로 발생시키는 단계 이후에,

상기 제 2 모듈과 상기 추가 속도 신호 발생기 사이에 연결된 제 2 수동성 관찰기를 통해, 상기 2 포트 네트워크 모듈 및 상기 추가 속도 신호 발생기를 통한 에너지의 흐름을 실시간으로 모니터링하는 단계; 및

상기 제 2 모듈과 상기 추가 속도 신호 발생기 사이에 연결된 제 2 수동성 제어기를 통해, 상기 제 2 수동성 관찰기에 기초하여 상기 2 포트 네트워크 모듈 및 상기 추가 속도 신호 발생기에서 생성된 에너지를 소모하도록

조절하는 단계

를 더 포함하는,

시간 영역 수동성 기반 원격제어에서 성능을 향상시키기 위한 방법.

청구항 15

제 14 항에 있어서,

상기 제 2 수동성 관찰기가 모니터링하는 에너지는,

식 $W_S(k) = E_{in}^M(k - T_f(k)) - E_{out}^S(k) + E_{PC}^S(k - 1)$ 로 표현되고,

여기서, 상기 E_{PC}^S 는 상기 제 2 수동성 제어기에 의해 교정되는 에너지의 값이며,

상기 제 2 수동성 제어기에 의해 교정되는 에너지는,

식 $E_{PC}^S(k) = \Delta T \sum_{j=0}^k \beta(j) f_s^2(j)$ 로 표현되고,

여기서, 상기 $\beta(j)$ 는 식
$$\beta(k) = \begin{cases} 0 & \text{if } W^S(k) > 0 \\ -\frac{W^S(k)}{\Delta T f_s^2(k)} & \text{else, if } |f_s(k)| > 0 \end{cases}$$
 로 표현되는,

시간 영역 수동성 기반 원격제어에서 성능을 향상시키기 위한 방법.

청구항 16

제 11 항에 있어서,

상기 제 2 모듈 측에서 상기 힘 신호를 상기 제 1 모듈 측으로 전송하는 단계 이후에,

상기 제 1 모듈과 상기 2 포트 네트워크 모듈 사이에 연결된 추가 힘 신호 발생기를 통해, 상기 제 1 모듈에 피드백된 힘의 오차를 보상하기 위해 힘 신호를 추가로 발생시키는 단계를 더 포함하는 - 상기 제 1 모듈에 피드백된 힘의 오차는 상기 제 2 모듈이 전송한 힘 신호와 상기 제 1 모듈이 수신한 힘 신호 사이의 차이에 의해 발생함 -,

시간 영역 수동성 기반 원격제어에서 성능을 향상시키기 위한 방법.

청구항 17

제 16 항에 있어서,

상기 추가 힘 신호 발생기는,

식 $f_{ad}(k) = \begin{cases} K_f(x_s(k - T_b) - x_m(k)), & \text{if } |x_s(k - T_b) - x_m(k)| > \gamma \\ 0, & \text{else} \end{cases}$ 에 의해 테드밴드를 갖고,

여기서, 상기 $f_{ad}(k)$ 는 상기 추가 힘 신호 발생기의 전압 값이며, 상기 $x_s(k - T_b)$ 는 상기 제 2 모듈에서 지연된 위치이며, 상기 $x_m(k)$ 는 상기 제 1 모듈의 현재 위치이며, 상기 K_f 는 상기 $x_s(k - T_b)$ 와 상기 $x_m(k)$ 사이의 오차 상에서 적용되는 이득(gain)이며, 상기 $|x_s(k - T_b) - x_m(k)| > \gamma$ 는 상기 제 2 모듈이 원격 환경과 실제로 접촉했는지를 감지하기 위한 조건인,

시간 영역 수동성 기반 원격제어에서 성능을 향상시키기 위한 방법.

청구항 18

제 16 항에 있어서,

상기 힘 신호를 추가로 발생시키는 단계 이후에,

상기 제 1 모듈과 상기 추가 힘 신호 발생기 사이에 연결된 제 1 수동성 관찰기를 통해, 상기 2 포트 네트워크 모듈 및 상기 추가 힘 신호 발생기를 통한 에너지의 흐름을 실시간으로 모니터링하는 단계; 및

상기 제 1 모듈과 상기 추가 힘 신호 발생기 사이에 연결된 제 1 수동성 제어기를 통해, 상기 제 1 수동성 관찰기에 기초하여 상기 2 포트 네트워크 모듈 및 상기 추가 힘 신호 발생기에서 생성된 에너지를 소모하도록 조절하는 단계

를 더 포함하는,

시간 영역 수동성 기반 원격제어에서 성능을 향상시키기 위한 방법.

청구항 19

제 18 항에 있어서,

상기 제 1 수동성 관찰기가 모니터링하는 에너지는,

식 $W_M(k) = E_{in}^S(k - T_b(k)) - E_{out}^M(k) + E_{PC}^M(k - 1)$ 로 표현되고,

여기서, 상기 E_{PC}^M 는 상기 제 1 수동성 제어기에 의해 교정되는 에너지의 값이며,

상기 제 1 수동성 제어기에 의해 교정되는 에너지는,

식 $E_{PC}^M(k) = \Delta T \sum_{j=0}^k \alpha(j) v_m^2(j)$ 로 표현되고,

여기서, 상기 $\alpha(j)$ 는 식
$$\alpha(k) = \begin{cases} 0 & \text{if } W^M(k) > 0 \\ -\frac{W^M(k)}{\Delta T v_m^2(k)} & \text{else, if } |v_m(k)| > 0 \end{cases}$$
 로 표현되는,

시간 영역 수동성 기반 원격제어에서 성능을 향상시키기 위한 방법.

청구항 20

제 11 항에 있어서,

상기 제 1 모듈 측에서 상기 속도 신호를 상기 제 2 모듈 측으로 전송하는 단계가, 상기 제 1 모듈 측에 연결된 가상 스프링 및 가상 질량을 통해, 상기 제 1 모듈에서 상기 제 2 모듈로 전송되는 속도 신호를 필터링하여, 상기 제 2 모듈에 저주파 성분을 전달하는 단계를 더 포함하거나, 또는

상기 제 2 모듈 측에서 상기 힘 신호를 상기 제 1 모듈 측으로 전송하는 단계가, 상기 제 1 모듈 측에 연결된 가상 스프링 및 가상 질량을 통해, 상기 제 1 모듈에 작용하는 갑작스러운 힘의 변화를 완충하여, 상기 제 1 모듈에 저주파 성분을 전달하는 단계를 더 포함하는,

시간 영역 수동성 기반 원격제어에서 성능을 향상시키기 위한 방법.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 시간 영역 수동성 기반 원격제어에서 성능을 향상시키기 위한 장치 및 방법으로서, 더욱 상세하게는, 시간 영역 수동성 기법(TDPA; Time Domain Passivity Approach)을 이용하여, 사용자는 제 1 장치(예컨대, 마스터 장치)를 통해 제 2 장치(예컨대, 슬레이브 장치)에 원하는 움직임을 전달하고, 제 2 장치는 제 1 장치를 통해 사용자에게 피드백된 힘을 전달하는 장치 및 방법에 관한 것이다.

배경 기술

[0003] 최근 양방향 원격제어 분야에서 시간 영역 수동성 기법은 설계의 용이함, 통신 지연에 대한 강건함(robustness), 다양한 응용가능성으로 인해 원격 수술, 원격 유지, 탐색 및 구출 및 원격 의약 등 다양한 분야에서 활용되고 있다. 이러한 시간 영역 수동성 기법은 시변 통신 지연과 원격 환경에서의 안정성을 강화하면서도, 시간 영역 수동성 기반의 양방향 원격제어에서의 성능을 향상시키기 위해 여러 기법들로 개발되고 있다.

[0004] 양방향 원격제어 분야에서 시-불변 수동성 기반 기법의 성능을 향상시키기 위한 몇몇 기법들이 제안되었다. 하지만, 시간-영역 수동성 기반 기법의 성능을 향상시키기 위한 기법들은 많이 제안되지 않았다. 예를 들어, Franken et al.은 시간 영역 수동성 기법 기반의 원격제어에서 투명성(transparency)을 향상시키기 위한 일반적인 기법을 제안했을 뿐, 그 특징을 뒷받침하기 위한 구체적인 분석 또는 데이터를 제시하지 않았다.

[0005] 또한, 시간 영역 수동성 기법 기반의 양방향 원격제어의 정확성을 향상시키기 위한 여러 기법들이 제안되었지만, 그 대부분은 마스터 장치와 슬레이브 장치 사이의 위치 차이를 보상하는 것에 초점을 두고 있을 뿐이다. 또한, 에너지 바운딩 알고리즘(EBA; Energy Bounding Algorithm)이 양방향 원격제어의 시간-영역 제어를 위해 제안되었고, 이는 시간 영역 수동성 기법 보다 질적으로 더 높은 투명성을 제공하지만, 마스터 장치 및 슬레이브 장치의 물리적 댐핑(damping) 파라미터에 대해 더 정확한 정보를 요구한다. 또한, 예측적인 시간 영역 수동성 제어 기법이 투명성을 향상시키기 위해 제안되었지만, 이는 통신 채널에서의 현재 시간 지연에 대해 더 정확한 측정을 요구한다.

[0006] 이러한 원격제어 분야에서, 마스터 장치와 슬레이브 장치 사이의 위치 오차 및 피드백되는 힘의 오차를 개선하는 것이 요구되고 있다.

[0007] 본 발명은, 상술한 기술적 배경을 바탕으로 발명되었으며, 이상에서 살핀 기술적 요구를 충족시킴은 물론 본 발명이 속하는 기술 분야에서 통상의 지식을 가진 자가 용이하게 발명할 수 없는 추가적인 기술요소들을 제공하기 위해 발명되었다.

발명의 내용

해결하려는 과제

[0009] 본 발명은, 제 1 모듈(예컨대, 마스터 모듈)에서 제 2 모듈(예컨대, 슬레이브 모듈)로 전달한 속도 신호에 의해 상기 제 2 모듈에서 발생한 위치 오차를 보상하고, 제 2 모듈에서 제 1 모듈로 전달한 힘 신호에 의해 상기 제 1 모듈에서 피드백된 힘의 오차를 보상하는 것을 해결과제로 한다.

[0010] 한편, 본 발명이 이루고자 하는 기술적 과제는 이상에서 언급한 기술적 과제로 제한되지 않으며, 이하에서 설명할 내용으로부터 통상의 기술자에게 자명한 범위 내에서 다양한 기술적 과제가 포함될 수 있다.

과제의 해결 수단

[0012] 상기와 같은 과제를 해결하기 위한 본 발명의 일 실시예에 따른 시간 영역 수동성 기반 원격제어에서 성능을 향상시키기 위한 장치는, 움직임을 대한 속도 신호를 생성하고, 상기 속도 신호를 제 2 모듈 측으로 전송하기 위한 제 1 모듈; 작용하는 힘을 나타내는 힘 신호를 생성하고, 상기 힘 신호를 상기 제 1 모듈 측으로 전송하기 위한 제 2 모듈; 및 상기 제 1 모듈과 상기 제 2 모듈 사이에 연결된 2 포트 네트워크 모듈을 포함하고, 상기 2 포트 네트워크 모듈은 상기 제 1 모듈 및 상기 제 2 모듈로 하여금 상기 속도 신호 또는 상기 힘 신호를 서로 교환하게 하는 것을 특징으로 한다.

[0013] 또한, 본 발명의 일 실시예에 따른 시간 영역 수동성 기반 원격제어에서 성능을 향상시키기 위한 장치는, 상기 제 2 모듈과 상기 2 포트 네트워크 모듈 사이에 연결된 추가 속도 신호 발생기를 더 포함하고, 상기 추가 속도 신호 발생기는, 상기 제 2 모듈에서 발생한 위치 오차를 보상하기 위해 속도 신호를 추가로 발생시키는 - 상기 제 2 모듈에서 발생한 위치 오차는 상기 제 1 모듈이 전송한 속도 신호와 상기 제 2 모듈이 수신한 속도 신호 사이의 차이에 의해 발생함 - 것을 특징으로 한다.

[0014] 또한, 본 발명의 일 실시예에 따른 시간 영역 수동성 기반 원격제어에서 성능을 향상시키기 위한 장치는, 상기

$$v_{ad}(k) = \frac{1}{\Delta T} \text{sat}_{\delta} \left(\hat{x}_{sd}(k) - \Delta T \sum_{j=0}^{k-1} v_{sd}(j) - \hat{v}_{sd}(k) \Delta T \right)$$

추가 속도 신호 발생기는, 식

$$v_{ad}(k)$$

에 의해 포화되고, 여기서, 상기 $v_{ad}(k)$ 는 상기 추가 속도 신호 발생기의 전류 값이며, 상기 ΔT 는 샘플링 기간이며, 상기 sat_{δ} 는 $\pm \delta$ ($\delta \geq 0$) 의 한계값을 갖는 포화 함수이며, 상기 $\hat{x}_{sd}(k)$ 는 상기 제 2 모듈에서 지연된 위치이며, 상기 $v_{sd}(j)$ 는 상기 제 2 모듈의 원하는 속도이며, 상기 $\hat{v}_{sd}(k)$ 는 상기 제 2 모듈에서 지연된 속도인 것을 특징으로 한다.

[0015] 또한, 본 발명의 일 실시예에 따른 시간 영역 수동성 기반 원격제어에서 성능을 향상시키기 위한 장치는, 상기 2 포트 네트워크 모듈 및 상기 추가 속도 신호 발생기를 통한 에너지의 흐름을 실시간으로 모니터링하기 위해, 상기 제 2 모듈과 상기 추가 속도 신호 발생기 사이에 연결된 제 2 수동성 관찰기(Passivity Observer); 및 상기 제 2 수동성 관찰기에 기초하여 상기 2 포트 네트워크 모듈 및 상기 추가 속도 신호 발생기에서 생성된 에너지를 소모하도록 조절하기 위해, 상기 제 2 모듈과 상기 추가 속도 신호 발생기 사이에 연결된 제 2 수동성 제어기(Passivity Controller)를 더 포함하는 것을 특징으로 한다.

[0016] 또한, 본 발명의 일 실시예에 따른 시간 영역 수동성 기반 원격제어에서 성능을 향상시키기 위한 장치는, 상기 제 2 수동성 관찰기가 모니터링하는 에너지는, 식 $W^S(k) = E_{in}^M(k - T_f(k)) - E_{out}^S(k) + E_{PC}^S(k - 1)$ 로 표현되고, 여기서, 상기 E_{PC}^S 는 상기 제 2 수동성 제어기에 의해 교정되는 에너지의 값이며, 상기 제 2 수동성 제어

$$E_{PC}^S(k) = \Delta T \sum_{j=0}^k \beta(j) f_s^2(j)$$

기에 의해 교정되는 에너지는, 식

$$\beta(k) = \begin{cases} 0 & \text{if } W^S(k) > 0 \\ -\frac{W^S(k)}{\Delta T f_s^2(k)} & \text{else, if } |f_s(k)| > 0 \end{cases}$$

로 표현되는 것을 특징으로 한다.

[0017] 또한, 본 발명의 일 실시예에 따른 시간 영역 수동성 기반 원격제어에서 성능을 향상시키기 위한 장치는, 상기 제 1 모듈과 상기 2 포트 네트워크 모듈 사이에 연결된 추가 힘 신호 발생기를 더 포함하고, 상기 추가 힘 신호 발생기는, 상기 제 1 모듈에 피드백된 힘의 오차를 보상하기 위해 힘 신호를 추가로 발생시키는 - 상기 제 1 모듈에 피드백된 힘의 오차는 상기 제 2 모듈이 전송한 힘 신호와 상기 제 1 모듈이 수신한 힘 신호 사이의 차이에 의해 발생함 - 것을 특징으로 한다.

[0018] 또한, 본 발명의 일 실시예에 따른 시간 영역 수동성 기반 원격제어에서 성능을 향상시키기 위한 장치는, 상기

$$f_{ad}(k) = \begin{cases} K_f(x_s(k - T_b) - x_m(k)), & \text{if } |x_s(k - T_b) - x_m(k)| > \gamma \\ 0, & \text{else} \end{cases}$$

추가 힘 신호 발생기는, 식

$$f_{ad}(k)$$

에 의해 데드밴드(deadband)를 갖고, 여기서, 상기 $f_{ad}(k)$ 는 상기 추가 힘 신호 발생기의 전압 값이며, 상기 $x_s(k - T_b)$ 는 상기 제 2 모듈에서 지연된 위치이며, 상기 $x_m(k)$ 는 상기 제 1 모듈의 현재 위치이며, 상기 K_f 는 상기

$x_s(k-T_b)$ 와 상기 $x_m(k)$ 사이의 오차 상에서 적용되는 이득(gain)이며, 상기 $|x_s(k-T_b) - x_m(k)| > \gamma$ 는 상기 제 2 모듈이 원격 환경과 실제로 접촉했는지를 감지하기 위한 조건인 것을 특징으로 한다.

[0019] 또한, 본 발명의 일 실시예에 따른 시간 영역 수동성 기반 원격제어에서 성능을 향상시키기 위한 장치는, 상기 2 포트 네트워크 모듈 및 상기 추가 힘 신호 발생기를 통한 에너지의 흐름을 실시간으로 모니터링하기 위해, 상기 제 1 모듈과 상기 추가 힘 신호 발생기 사이에 연결된 제 1 수동성 관찰기; 및 상기 제 1 수동성 관찰기에 기초하여 상기 2 포트 네트워크 모듈 및 상기 추가 힘 신호 발생기에서 생성된 에너지를 소모하도록 조절하기 위해, 상기 제 1 모듈과 상기 추가 힘 신호 발생기 사이에 연결된 제 1 수동성 제어기를 더 포함하는 것을 특징으로 한다.

[0020] 또한, 본 발명의 일 실시예에 따른 시간 영역 수동성 기반 원격제어에서 성능을 향상시키기 위한 장치는, 상기 제 1 수동성 관찰기가 모니터링하는 에너지는, 식 $W_M(k) = E_{in}^S(k-T_b(k)) - E_{out}^M(k) + E_{PC}^M(k-1)$ 로 표현되고, 여기서, 상기 E_{PC}^M 는 상기 제 1 수동성 제어기에 의해 교정되는 에너지의 값이며, 상기 제 1 수동성 제어

기에 의해 교정되는 에너지는, 식 $E_{PC}^M(k) = \Delta T \sum_{j=0}^k \alpha(j) v_m^2(j)$ 로 표현되고, 여기서, 상기 $\alpha(j)$ 는 식

$$\alpha(k) = \begin{cases} 0 & \text{if } W^M(k) > 0 \\ -\frac{W^M(k)}{\Delta T v_m^2(k)} & \text{else, if } |v_m(k)| > 0 \end{cases}$$

로 표현되는 것을 특징으로 한다.

[0021] 또한, 본 발명의 일 실시예에 따른 시간 영역 수동성 기반 원격제어에서 성능을 향상시키기 위한 장치는, 상기 제 1 모듈 측에 연결된 가상 스프링 및 가상 질량을 더 포함하고, 상기 가상 스프링 및 가상 질량은, 상기 제 1 모듈에 작용하는 갑작스러운 힘의 변화를 완충하여, 상기 제 1 모듈에 저주파 성분을 전달하며, 그리고 상기 제 1 모듈에서 상기 제 2 모듈로 전송되는 속도 신호를 필터링하여, 상기 제 2 모듈에 저주파 성분을 전달하는 것을 특징으로 한다.

[0022] 한편, 상기와 같은 과제를 해결하기 위한 본 발명의 일 실시예에 따른 시간 영역 수동성 기반 원격제어에서 성능을 향상시키기 위한 방법은, 제 1 모듈 측에서, 움직임에 대한 속도 신호를 생성하는 단계; 상기 제 1 모듈 측에서, 상기 제 1 모듈과 제 2 모듈 사이에 연결된 2 포트 네트워크 모듈을 통해 상기 속도 신호를 상기 제 2 모듈 측으로 전송하는 단계; 상기 제 2 모듈 측에서, 작용하는 힘을 나타내는 힘 신호를 생성하는 단계; 및 상기 제 2 모듈 측에서, 상기 2 포트 네트워크 모듈을 통해 상기 힘 신호를 상기 제 1 모듈 측으로 전송하는 단계를 포함하는 것을 특징으로 한다.

[0023] 또한, 본 발명의 일 실시예에 따른 시간 영역 수동성 기반 원격제어에서 성능을 향상시키기 위한 방법은, 상기 제 1 모듈 측에서 상기 속도 신호를 상기 제 2 모듈 측으로 전송하는 단계 이후에, 그리고 상기 제 2 모듈 측에서 상기 힘 신호를 생성하는 단계 이전에, 상기 제 2 모듈과 상기 2 포트 네트워크 모듈 사이에 연결된 추가 속도 신호 발생기를 통해, 상기 제 2 모듈에서 발생한 위치 오차를 보상하기 위해 속도 신호를 추가로 발생시키는 단계를 더 포함하는 - 상기 제 2 모듈에서 발생한 위치 오차는 상기 제 1 모듈이 전송한 속도 신호와 상기 제 2 모듈이 수신한 속도 신호 사이의 차이에 의해 발생함 - 것을 특징으로 한다.

[0024] 또한, 본 발명의 일 실시예에 따른 시간 영역 수동성 기반 원격제어에서 성능을 향상시키기 위한 방법은, 상기

추가 속도 신호 발생기는, 식 $v_{ad}(k) = \frac{1}{\Delta T} \text{sat}_{\delta} \left(\hat{x}_{sd}(k) - \Delta T \sum_{j=0}^{k-1} v_{sd}(j) - \hat{v}_{sd}(k) \Delta T \right)$ 에 의해 포화되고, 여

기서, 상기 $v_{ad}(k)$ 는 상기 추가 속도 신호 발생기의 전류 값이며, 상기 ΔT 는 샘플링 시간이며, 상기

sat_{δ} 는 $\pm \delta$ ($\delta \geq 0$) 의 한계값을 갖는 포화 함수이며, 상기 $\hat{x}_{sd}(k)$ 는 상기 제 2 모듈에서 지연된 위치이며, 상기 $v_{sd}(j)$ 는 상기 제 2 모듈의 원하는 속도이며, 상기 $\hat{v}_{sd}(k)$ 는 상기 제 2 모듈에서 지연된 속

도인 것을 특징으로 한다.

[0025] 또한, 본 발명의 일 실시예에 따른 시간 영역 수동성 기반 원격제어에서 성능을 향상시키기 위한 방법은, 상기 속도 신호를 추가로 발생시키는 단계 이후에, 상기 제 2 모듈과 상기 추가 속도 신호 발생기 사이에 연결된 제 2 수동성 관찰기를 통해, 상기 2 포트 네트워크 모듈 및 상기 추가 속도 신호 발생기를 통한 에너지의 흐름을 실시간으로 모니터링하는 단계; 및 상기 제 2 모듈과 상기 추가 속도 신호 발생기 사이에 연결된 제 2 수동성 제어기를 통해, 상기 제 2 수동성 관찰기에 기초하여 상기 2 포트 네트워크 모듈 및 상기 추가 속도 신호 발생기에서 생성된 에너지를 소모하도록 조절하는 단계를 더 포함하는 것을 특징으로 한다.

[0026] 또한, 본 발명의 일 실시예에 따른 시간 영역 수동성 기반 원격제어에서 성능을 향상시키기 위한 방법은, 상기 제 2 수동성 관찰기가 모니터링하는 에너지는, 식 $W_S(k) = E_{in}^M(k - T_f(k)) - E_{out}^S(k) + E_{PC}^S(k - 1)$ 로 표현되고, 여기서, 상기 E_{PC}^S 는 상기 제 2 수동성 제어기에 의해 교정되는 에너지의 값이며, 상기 제 2 수동성 제어

$$E_{PC}^S(k) = \Delta T \sum_{j=0}^k \beta(j) f_s^2(j)$$

기에 의해 교정되는 에너지는, 식 로 표현되고, 여기서, 상기 $\beta(j)$ 는 식

$$\beta(k) = \begin{cases} 0 & \text{if } W^S(k) > 0 \\ -\frac{W^S(k)}{\Delta T f_s^2(k)} & \text{else, if } |f_s(k)| > 0 \end{cases}$$

로 표현되는 것을 특징으로 한다.

[0027] 또한, 본 발명의 일 실시예에 따른 시간 영역 수동성 기반 원격제어에서 성능을 향상시키기 위한 방법은, 상기 제 2 모듈 측에서 상기 힘 신호를 상기 제 1 모듈 측으로 전송하는 단계 이후에, 상기 제 1 모듈과 상기 2 포트 네트워크 모듈 사이에 연결된 추가 힘 신호 발생기를 통해, 상기 제 1 모듈에 피드백된 힘의 오차를 보상하기 위해 힘 신호를 추가로 발생시키는 단계를 더 포함하는 - 상기 제 1 모듈에 피드백된 힘의 오차는 상기 제 2 모듈이 전송한 힘 신호와 상기 제 1 모듈이 수신한 힘 신호 사이의 차이에 의해 발생함 - 것을 특징으로 한다.

[0028] 또한, 본 발명의 일 실시예에 따른 시간 영역 수동성 기반 원격제어에서 성능을 향상시키기 위한 방법은, 상기

$$f_{ad}(k) = \begin{cases} K_f(x_s(k - T_b) - x_m(k)), & \text{if } |x_s(k - T_b) - x_m(k)| > \gamma \\ 0, & \text{else} \end{cases}$$

추가 힘 신호 발생기는, 식 에 의해 데드밴드

를 갖고, 여기서, 상기 $f_{ad}(k)$ 는 상기 추가 힘 신호 발생기의 전압 값이며, 상기 $x_s(k - T_b)$ 는 상기 제 2 모듈에서 지연된 위치이며, 상기 $x_m(k)$ 는 상기 제 1 모듈의 현재 위치이며, 상기 K_f 는 상기 $x_s(k - T_b)$ 와 상기 $x_m(k)$ 사이의 오차 상에서 적용되는 이득(gain)이며, 상기 $|x_s(k - T_b) - x_m(k)| > \gamma$ 는 상기 제 2 모듈이 원격 환경과 실제로 접촉했는지를 감지하기 위한 조건인 것을 특징으로 한다.

[0029] 또한, 본 발명의 일 실시예에 따른 시간 영역 수동성 기반 원격제어에서 성능을 향상시키기 위한 방법은, 상기 힘 신호를 추가로 발생시키는 단계 이후에, 상기 제 1 모듈과 상기 추가 힘 신호 발생기 사이에 연결된 제 1 수동성 관찰기를 통해, 상기 2 포트 네트워크 모듈 및 상기 추가 힘 신호 발생기를 통한 에너지의 흐름을 실시간으로 모니터링하는 단계; 및 상기 제 1 모듈과 상기 추가 힘 신호 발생기 사이에 연결된 제 1 수동성 제어기를 통해, 상기 제 1 수동성 관찰기에 기초하여 상기 2 포트 네트워크 모듈 및 상기 추가 힘 신호 발생기에서 생성된 에너지를 소모하도록 조절하는 단계를 더 포함하는 것을 특징으로 한다.

[0030] 또한, 본 발명의 일 실시예에 따른 시간 영역 수동성 기반 원격제어에서 성능을 향상시키기 위한 방법은, 상기 제 1 수동성 관찰기가 모니터링하는 에너지는, 식 $W_M(k) = E_{in}^S(k - T_b(k)) - E_{out}^M(k) + E_{PC}^M(k - 1)$ 로 표현되고, 여기서, 상기 E_{PC}^M 는 상기 제 1 수동성 제어기에 의해 교정되는 에너지의 값이며, 상기 제 1 수동성 제어

기에 의해 교정되는 에너지는, 식
$$E_{PC}^M(k) = \Delta T \sum_{j=0}^k \alpha(j) v_m^2(j)$$
 로 표현되고, 여기서, 상기 $\alpha(j)$ 는 식

$$\alpha(k) = \begin{cases} 0 & \text{if } W^M(k) > 0 \\ -\frac{W^M(k)}{\Delta T v_m^2(k)} & \text{else, if } |v_m(k)| > 0 \end{cases}$$

로 표현되는 것을 특징으로 한다.

[0031] 또한, 본 발명의 일 실시예에 따른 시간 영역 수동성 기반 원격제어에서 성능을 향상시키기 위한 방법은, 상기 제 1 모듈 측에서 상기 속도 신호를 상기 제 2 모듈 측으로 전송하는 단계가, 상기 제 1 모듈 측에 연결된 가상 스프링 및 가상 질량을 통해, 상기 제 1 모듈에서 상기 제 2 모듈로 전송되는 속도 신호를 필터링하여, 상기 제 2 모듈에 저주파 성분을 전달하는 단계를 더 포함하거나, 또는 상기 제 2 모듈 측에서 상기 힘 신호를 상기 제 1 모듈 측으로 전송하는 단계가, 상기 제 1 모듈 측에 연결된 가상 스프링 및 가상 질량을 통해, 상기 제 1 모듈에 작용하는 갑작스러운 힘의 변화를 완충하여, 상기 제 1 모듈에 저주파 성분을 전달하는 단계를 더 포함하는 것을 특징으로 한다.

발명의 효과

[0033] 본 발명은 추가 속도 신호 발생기를 통해 제 2 모듈에서의 위치 오차를 보상하고, 추가 힘 신호 발생기를 통해 제 1 모듈에 피드백된 힘의 오차를 보상하면서도, 수동성 관찰기 및 수동성 제어기를 통해 시스템 전체의 수동성을 유지하여 안정성을 도모할 수 있게 한다.

[0034] 또한, 본 발명은 추가 속도 신호 발생기를 통해 제 2 모듈에서의 위치 오차를 보상하면서도 $\pm\delta (\delta \geq 0)$ 의 한 계값을 설정하여, 제 2 모듈이 일정 범위를 초과하여 위치 오차를 보상받는 것을 방지하고, 단일 시간 동안 과도한 위치 드리프트 보상으로 인해 갑작스러운 힘 변화를 발생시키는 것을 방지할 수 있게 한다.

[0035] 또한, 본 발명은 추가 힘 신호 발생기를 통해 제 1 모듈에 피드백된 힘의 오차를 보상하면서도 일정 범위의 데드밴드(deadband)를 설정하여, 제 2 모듈이 원격 환경과 실제로 접촉이 발생했을 때에 제 1 모듈이 피드백된 힘의 오차를 보상받을 수 있게 한다.

[0036] 또한, 본 발명은 가상 스프링 및 가상 질량을 통해, 제 1 모듈에 작용하는 갑작스러운 힘의 변화를 완충하여, 상기 제 1 모듈에 저주파 성분을 전달할 수 있게 하고, 제 1 모듈에서 제 2 모듈로 전송되는 속도 신호를 필터링하여, 상기 제 2 모듈에 저주파 성분을 전달할 수 있게 한다.

[0037] 한편, 본 발명의 효과는 이상에서 언급한 효과들로 제한되지 않으며, 이하에서 설명할 내용으로부터 통상의 기술자에게 자명한 범위 내에서 다양한 효과들이 포함될 수 있다.

도면의 간단한 설명

[0039] 도 1은 제 1 장치와 제 2 장치 사이의 양방향 원격제어를 나타내는 개략도이다.

도 2는 위치-힘 원격제어의 설계를 나타내는 회로도이다.

도 3은 2 포트 네트워크(예컨대, 시간 지연 전력 네트워크(TDPN; Time Delay Power Network))를 이용하여 위치-힘 원격제어의 설계를 나타내는 회로도이다.

도 4는 시간 지연 전력 네트워크에서의 에너지 흐름을 나타내는 회로도이다.

도 5a는 임피던스 구성의 수동성 관찰기 및 수동성 제어기를 이용하여 수동화된 시간 지연 전력 네트워크를 나타내는 회로도이다.

도 5b는 어드미턴스 구성의 수동성 관찰기 및 수동성 제어기를 이용하여 수동화된 시간 지연 전력 네트워크를 나타내는 회로도이다.

도 6은 통신 채널을 통해 신호들을 전송 및 수신하는 개념도이다.

도 7a는 본 발명의 일 실시예에 따라 제 2 모듈 측의 수동성 관찰기 및 수동성 제어기의 동작 이전에 추가 속도 신호 발생기를 통해 위치 드리프트 보상하는 것을 나타내는 회로도이다.

도 7b는 본 발명의 일 실시예에 따라 제 2 모듈 측의 수동성 관찰기 및 수동성 제어기의 동작 이후에 추가 속도 신호 발생기를 통해 위치 드리프트 보상하는 것을 나타내는 회로도이다.

도 8은 본 발명의 일 실시예에 따라 제 1 모듈 측의 추가 힘 신호 발생기를 통해 힘 보상하는 것을 나타내는 회로도이다.

도 9a는 본 발명의 일 실시예에 따라 제 1 모듈 측에 연결된 시간 지연 전력 네트워크를 나타내는 회로도이다.

도 9b는 본 발명의 일 실시예에 따라 제 2 모듈 측에 연결된 시간 지연 전력 네트워크를 나타내는 회로도이다.

도 10은 듀얼 PHANTOM 원격제어 장치를 이용하여 테스트를 수행하는 사진이다.

도 11은 본 발명의 일 실시예에 따라 위치 드리프트 및 힘 보상하는 것을 이용하여 시간 지연 양방향 원격제어의 설계를 나타내는 회로도이다.

도 12a는 시간 영역 수동성 기법을 이용한 양방향 원격제어에서, 제 1 모듈과 제 2 모듈 사이의 위치 관계를 나타내는 그래프이다.

도 12b는 시간 영역 수동성 기법을 이용한 양방향 원격제어에서, 제 1 모듈과 제 2 모듈 사이에서 제어되는 힘의 관계를 나타내는 그래프이다.

도 12c는 시간 영역 수동성 기법을 이용한 양방향 원격제어에서, 제 1 모듈에서의 출력 에너지와 제 2 모듈로부터 지연된 입력 에너지의 관계를 나타내는 그래프이다.

도 12d는 시간 영역 수동성 기법을 이용한 양방향 원격제어에서, 제 2 모듈에서의 출력 에너지와 제 1 모듈로부터 지연된 입력 에너지의 관계를 나타내는 그래프이다.

도 13a는 본 발명의 일 실시예에 따른 PDC_B_PC_FC 제어 설계를 이용한 양방향 원격제어에서, 제 1 모듈과 제 2 모듈 사이의 위치 관계를 나타내는 그래프이다.

도 13b는 본 발명의 일 실시예에 따른 PDC_B_PC_FC 제어 설계를 이용한 양방향 원격제어에서, 제 1 모듈과 제 2 모듈 사이에서 제어되는 힘의 관계를 나타내는 그래프이다.

도 13c는 본 발명의 일 실시예에 따른 PDC_B_PC_FC 제어 설계를 이용한 양방향 원격제어에서, 제 1 모듈에서의 출력 에너지와 제 2 모듈로부터 지연된 입력 에너지의 관계를 나타내는 그래프이다.

도 13d는 본 발명의 일 실시예에 따른 PDC_B_PC_FC 제어 설계를 이용한 양방향 원격제어에서, 제 2 모듈에서의 출력 에너지와 제 1 모듈로부터 지연된 입력 에너지의 관계를 나타내는 그래프이다.

도 14는 본 발명의 일 실시예에 따라 상이한 통신 지연 조건들 하에서 구현되고, 자유 공간 움직임을 수행하는 제어기들의 SSE 및 RMSE를 나타내는 그래프이다.

도 15는 본 발명의 일 실시예에 따라 상이한 통신 지연 조건들 하에서 구현되고, 단단한 접촉(hard contact)시의 상호작용을 수행하는 제어기들의 SSE를 나타내는 그래프이다.

도 16은 본 발명의 일 실시예에 따라 상이한 통신 지연 조건들 하에서 구현되고, 단단한 접촉시의 상호작용을 수행하는 제어기들의 감각 강도(Perceived stiffness)의 값들을 나타내는 그래프이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0040] 이하, 첨부된 도면들을 참조하여 본 발명에 따른 '시간 영역 수동성 기반 원격제어에서 성능을 향상시키기 위한 장치 및 방법'을 상세하게 설명한다. 설명하는 실시예들은 본 발명의 기술 사상을 통상의 기술자가 용이하게 이해할 수 있도록 제공되는 것으로 이에 의해 본 발명이 한정되지 않는다. 또한, 첨부된 도면에 표현된 사항들은 본 발명의 실시예들을 쉽게 설명하기 위한 도식화된 도면으로 실제로 구현되는 형태와 상이할 수 있다.

[0041] 한편, 이하에서 표현되는 각 구성부는 본 발명을 구현하기 위한 예일 뿐이다. 따라서, 본 발명의 다른 구현에서는 본 발명의 사상 및 범위를 벗어나지 않는 범위에서 다른 구성부가 사용될 수 있다.

[0042] 또한, 어떤 구성요소들을 '포함'한다는 표현은, 개방형의 표현으로서 해당 구성요소들이 존재하는 것을 단순히

지칭할 뿐이며, 추가적인 구성요소들을 배제하는 것으로 이해되어서는 안 된다.

- [0043] 또한, '제 1, 제 2' 등과 같은 표현은, 복수의 구성들을 구분하기 위한 용도로만 사용된 표현으로써, 구성들 사이의 순서나 기타 특징들을 한정하지 않는다.
- [0044] 또한, 본 교시들이 다양한 실시예들과 관련하여 기술되지만, 본 교시들이 그러한 실시예들로 한정되도록 의도되지 않는다. 오히려, 본 기술분야의 통상의 기술자들에 의해 이해되는 바와 같이, 본 교시들은 다양한 대안들, 수정들, 및 동등물들을 포함한다.
- [0045] 이하, 도 1을 통해, 제 1 장치와 제 2 장치 사이의 양방향 원격제어에 대하여 구체적으로 살펴본다.
- [0046] 도 1을 참조하면, 양방향 원격 제어는 사용자로 하여금 제 1 장치(마스터 장치, 예컨대 로컬 로봇 장치)를 이용하여 제 2 장치(슬레이브 장치, 예컨대 원격 로봇 장치)를 제어하게 할 수 있다. 하지만, 이러한 제 1 장치와 제 2 장치는 서로 물리적으로 분리되어 있으며, 명령 및 피드백 신호들을 전송할 때 통신 지연들을 일으킬 수 있다. 따라서, 이러한 시간-지연을 갖는 통신 채널은 불안정적일 수 있다.
- [0047] 이러한 시간-지연 양방향 원격 제어에서, 수동성의 개념은 시스템의 불안정성을 설명하는 중요한 개념일 수 있다. 시스템이 수동성 조건을 만족하면, 그 시스템은 안정해지지만, 수동성의 조건은 안정성에 대한 충분조건이다. 시간-지연 양방향 원격제어에서 제 1 장치와 제 2 장치는 항상 수동적이지만, 시간-지연을 갖는 통신 채널은 수동적이지 않고 불안정성을 야기할 수 있다.
- [0048] 따라서, 시간 영역 수동성 기법은 통신 채널의 수동성을 강화하기 위해 에너지를 방출하기도 하지만, 이러한 에너지 방출은 원격제어의 성능을 감소시킬 수 있다. 이러한 원격제어 성능의 감소는 제 1 장치와 제 2 장치 사이의 위치 오차, 피드백되는 힘의 오차를 발생시킬 수 있다.
- [0049] 이하, 도 2를 통해 위치-힘 원격제어의 설계에 대하여 구체적으로 살펴본다. 참고로, 상기 제 1 장치 및 상기 제 2 장치는 이하 설명되는 도면들의 회로도 상에서 제 1 모듈(예컨대, 마스터 모듈) 및 제 2 모듈(예컨대, 슬레이브 모듈)로 각각 표현될 수 있다.
- [0050] 도 2를 참조하면, 기계-전기적 유추기법을 사용하여, 제 1 모듈과 제 2 모듈, 제 2 모듈 제어기, 조작하는 사용자 및 원격 환경은 수동적인 전기 회로 성분들을 사용하여 표현될 수 있다. 여기서 속도 신호 및 힘 신호는 전류 신호 및 전압 신호로 각각 표현될 수 있다.
- [0051] 하지만, 시변 지연을 갖는 통신 채널은 수동적 전기 회로 성분으로 표현되기 어려울 수 있고, 능동성(activity)을 네트워크에 잠재적으로 주입할 수 있어 불안정할 수 있다.
- [0052] 이러한 양방향 원격제어에서의 안정성을 강화하기 위해, 시간 영역 수동성 기법이 제안되었고, 이러한 시간 영역 수동성 기법은 Artigas et al.에 의해 제안된 시간 지연 전력 네트워크(TDPN; Time Delay Power Network)를 통해 피드백 신호가 다시 전송될 때의 불분명한 네트워크 인과성을 해결하도록 발전되었다.
- [0053] 이하, 도 3을 통해 시간 지연 전력 네트워크를 이용한 위치-힘 원격제어의 설계에 대하여 구체적으로 살펴본다. 이하 본 명세서에서 표현되는 "시간 지연 전력 네트워크"는 2 포트 네트워크로서, 명령 및 피드백 신호들을 대응하는 전류원 또는 전압원으로 모델링하며, 이러한 시간 지연 전력 네트워크를 시간 영역 수동성 기법으로 설계시 통신 채널은 수동적으로 될 수 있다.
- [0054] 구체적으로, 도 3을 참조하면, 도 2의 통신 채널의 블록도를 두 개의 2 포트 네트워크(예컨대, 시간 지연 전력 네트워크) 모듈을 사용한 통신 채널들로 표현할 수 있다. 상기 두 개의 2 포트 네트워크 모듈 중 하나의 2 포트 네트워크 모듈은 제 1 모듈 측에 연결되고, 다른 하나의 2 포트 네트워크 모듈은 제 2 모듈 측에 연결될 수 있다. 이러한 두 개의 2 포트 네트워크 모듈들이 시간 영역 수동성 기법을 사용하여 수동적으로 만들어지면, 통신 채널은 수동적으로 될 것이고, 따라서 전체의 양방향 원격제어 시스템이 수동적으로 될 수 있으며, 전체 시스템이 안정해질 수 있다.
- [0055] 이러한, 시간 영역 수동성 기법은 네트워크의 에너지 흐름을 실시간으로 모니터링하기 위한 수동성 관찰기(PO) 및 네트워크 내의 능동 소자들에 의해 도입된 에너지를 소모하도록 조절하는 수동성 제어기(PC)를 이용하여 설명할 수 있다. .
- [0056] 이하, 도 4를 통해 시간 지연 전력 네트워크에서의 에너지 흐름에 대하여 구체적으로 살펴본다.

[0057] 도 4를 참조하면, 시간 지연 전력 네트워크 에너지($E_N(k)$)의 흐름은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

수학식 1

[0058]
$$E_N(k) = E^M(k) + E^S(k), \forall k \geq 0$$

[0059] 여기서, $E^M(k)$ 는 제 1 포트에서의 에너지이고, $E^S(k)$ 는 제 2 포트에서의 에너지이며, 이들은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

수학식 2

[0060]
$$E^M(k) = \Delta T \sum_{j=0}^k f_1(j) v_1(j) \text{ and}$$

$$E^S(k) = \Delta T \sum_{j=0}^k f_2(j) v_2(j), \forall k \geq 0$$

[0061] 여기서, ΔT 는 샘플링 기간이다.

[0062] 상기 제 1 포트 및 상기 제 2 포트에서의 에너지는 다음과 같이 입출력 에너지로 나타낼 수 있다.

수학식 3

[0063]
$$E^M(k) = E_{in}^M(k) - E_{out}^M(k), \forall k \geq 0$$

$$E^S(k) = E_{in}^S(k) - E_{out}^S(k), \forall k \geq 0$$

[0064] 즉, 시간 지연 전력 네트워크의 수동성 조건은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

수학식 4

[0065]
$$E^N(k) = E^M(k) + E^S(k) \geq 0, \forall k \geq 0$$

[0066] 이 때, 상기 $E^M(k)$ 및 $E^S(k)$ 는 시간 지연 때문에 동시에 관찰될 수 없기 때문에, 상기 수동성 조건은 실시간으로 체크될 수 없다. 따라서, 이를 해결하기 위해, 상기 수학식 3 및 상기 수학식 4를 결합하면, 수동성 조건을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

수학식 5

[0067]
$$E^N(k) = E_{in}^M(k) - E_{out}^M(k) + E_{in}^S(k) - E_{out}^S(k)$$

$$= E^{L2R}(k) + E^{R2L}(k) \geq 0, \forall k \geq 0$$

[0068] 여기서, 제 1 포트(좌측 포트)에서 제 2 포트(우측 포트)로 전달된 에너지 및 제 2 포트(우측 포트)에서 제 1 포트(좌측 포트)로 전달된 에너지는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

수학식 6

$$\begin{aligned} E^{L2R}(k) &= E_{in}^M(k) - E_{out}^S(k), \text{ and} \\ E^{R2L}(k) &= E_{in}^S(k) - E_{out}^M(k) \end{aligned}$$

여기서, 수동성 조건은 $E^{L2R}(k) \geq 0$, $E^{R2L}(k) \geq 0$ 이면 만족할 수 있다. 따라서, 시간 지연을 고려하여, 관찰가능한 수동성 조건은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

수학식 7

$$\begin{aligned} E_{obs}^{L2R}(k) &= E_{in}^M(k - T_f(k)) - E_{out}^S(k) \geq 0, \forall k \geq 0, \\ E_{obs}^{R2L}(k) &= E_{in}^S(k - T_b(k)) - E_{out}^M(k) \geq 0, \forall k \geq 0. \end{aligned}$$

즉, 수동성 조건은 물리적으로, 한 포트에서의 출력 에너지가 반대편 포트에서의 입력 에너지를 상한으로 하여 항상 제한받는 것을 의미할 수 있다.

이하, 도 5를 통해 수동성 관찰기 및 수동성 제어기를 이용하여 수동화된 시간 지연 전력 네트워크에 대하여 구체적으로 살펴본다.

수동성 관찰기는 수동성 제어기에 의해 교정되는 에너지를 고려하여, 수동성 조건을 실시간으로 계산한다. 시간 지연 전력 네트워크에서 각각의 포트를 위한 두 개의 수동성 관찰기들이 모니터링하는 에너지들($W_M(k)$, $W_S(k)$)을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

수학식 8

$$\begin{aligned} W_M(k) &= E_{in}^S(k - T_b(k)) - E_{out}^M(k) + E_{PC}^M(k - 1), \text{ and} \\ W_S(k) &= E_{in}^M(k - T_f(k)) - E_{out}^S(k) + E_{PC}^S(k - 1). \end{aligned}$$

여기서, E_{PC}^M 및 E_{PC}^S 는 수동성 제어기에 의해 교정되는 에너지 값들이다.

수동성 제어기는 임의의 초과 에너지를 방출함으로써, 한 포트에서의 출력 에너지를 반대편 포트로부터의 입력 에너지로 제한하는 가변 댐퍼(damper)이다.

도 5a를 참조하면, 임피던스 구성에서, 수동성 제어기는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

수학식 9

$$f_m(k) = \hat{f}_m(k) + \alpha(k)v_m(k)$$

여기서, 상기 $\hat{f}_m(k) = f_s(k - T_b(k))$ 는 제 1 모듈이 수신하는 힘 신호이다. 또한, 상기 $\alpha(k)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있으며,

수학식 10

$$\alpha(k) = \begin{cases} 0 & \text{if } W^M(k) > 0 \\ -\frac{W^M(k)}{\Delta T v_m^2(k)} & \text{else, if } |v_m(k)| > 0 \end{cases}$$

[0081]

[0082] 수동성 제어기가 교정하는 에너지는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

수학식 11

$$E_{PC}^M(k) = \Delta T \sum_{j=0}^k \alpha(j) v_m^2(j)$$

[0083]

[0084] 한편, 전기 회로에서, 수동성 제어기는 임피던스 또는 어드미턴스 구성에 따라 직렬 또는 병렬로 연결된 가변 저항으로 표현될 수 있다. 하지만, 본 명세서의 도면에서는 수동성 제어를 편의상 블록도로 표현한다. 참고로, 임피던스 구성에서, 블록 α 는 시간 지연 전력 네트워크로부터 나오는 힘 신호를 수정하기 위해 사용될 수 있다.

[0085] 도 5b를 참조하면, 어드미턴스 구성에서, 수동성 제어기는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

수학식 12

$$v_{sd}(k) = \hat{v}_{sd}(k) + \beta(k) f_s(k)$$

[0086]

[0087] 여기서, 상기 $\hat{v}_{sd}(k) = v_m(k - T_f(k))$ 는 제 2 모듈이 수신하는 속도 신호이다. 또한, 상기 $\beta(k)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있으며,

수학식 13

$$\beta(k) = \begin{cases} 0 & \text{if } W^S(k) > 0 \\ -\frac{W^S(k)}{\Delta T f_s^2(k)} & \text{else, if } |f_s(k)| > 0 \end{cases}$$

[0088]

[0089] 수동성 제어기가 교정하는 에너지는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

수학식 14

$$E_{PC}^S(k) = \Delta T \sum_{j=0}^k \beta(j) f_s^2(j)$$

[0090]

[0091] 참고로, 어드미턴스 구성에서, 블록 β 는 시간 지연 전력 네트워크로부터 나오는 속도 신호를 수정하기 위해 사용될 수 있다.

[0092] 힘과 위치 신호들은 서로 독립된 신호들일 수 있다. 따라서 수동성 기반 기법들에서, 속도 명령은 제 1 모듈

측에서 제 2 모듈 측으로 전송되고, 위치 명령은 전송된 속도를 시간에 대해 적분함으로써 획득될 수 있는바 이를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

수학식 15

$$x_{sd}(k) = \Delta T \sum_{j=0}^k v_{sd}(j)$$

하지만, 시변 지연 및 패킷 손실 때문에, $x_{sd}(k)$ 는 지연된 제 1 모듈의 위치 $\hat{x}_{sd}(k) = x_m(k - T_f)$ 와 상이할 것이고, 이는 양방향 원격제어 시스템의 위치 추적 및 피드백된 힘에 모두 영향을 미칠 수 있다.

이하, 도 6에서 통신 채널을 이용하여 신호들을 전송 및 수신하는 구성을 통해, 제 1 모듈과 제 2 모듈 측의 수동성 제어기의 동작이 어떻게 위치 드리프트 및 힘 감쇠에 적용되는지에 대해 살펴본다.

도 6을 참조하면, 제 1 모듈 측에서 전송하는 속도는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

수학식 16

$$v_m(k) = \frac{x_m(k) - x_m(k-1)}{\Delta T}$$

그러면, 제 2 모듈 측에서 수신하는 속도는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

수학식 17

$$\begin{aligned} \hat{v}_{sd}(k) &= v_m(k - T_f(k)) \\ &= \frac{x_m(k - T_f(k)) - x_m(k - 1 - T_f(k))}{\Delta T} \\ &= \frac{x_m(k - T_f(k)) - x_m(k - 1 - T_f(k - 1))}{\Delta T} \\ &\quad + \frac{x_m(k - 1 - T_f(k - 1)) - x_m(k - 1 - T_f(k))}{\Delta T} \\ &= \frac{x_m(k - T_f(k)) - x_m(k - 1 - T_f(k - 1))}{\Delta T} \\ &\quad + \frac{\Delta x_d(k)}{\Delta T} \end{aligned}$$

여기서, $\Delta x_d(k) = x_m(k - 1 - T_f(k - 1)) - x_m(k - 1 - T_f(k))$ 이다.

상기 수학식 17의 양변을 모두 합하고, $x_m(0) = 0$ 이라 가정하면, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

수학식 18

$$\begin{aligned}\sum_{j=0}^k \hat{v}_{sd}(j) &= \frac{x_m(k - T_f(k))}{\Delta T} + \frac{1}{\Delta T} \sum_{j=0}^k \Delta x_d(j) \\ \Rightarrow \hat{x}_{sd}(k) &= x_m(k - T_f(k)) \\ &= \Delta T \sum_{j=0}^k \hat{v}_{sd}(j) - \sum_{j=0}^k \Delta x_d(j)\end{aligned}$$

[0102]

[0103] 또한, 제 2 모듈 측의 수동성 제어기는 어드미턴스 인과성(causality)을 갖고 지연된 속도 $\hat{v}_{sd}(k)$ 에 대해 에너지를 소모하도록 수정할 수 있다. 따라서, 수정된 위치 명령 신호는 드리프트를 발생시키고, 이는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

수학식 19

$$\begin{aligned}x_{err}(k) &= x_{sd}(k) - \hat{x}_{sd}(k) \\ &= \Delta T \sum_{j=0}^k v_{sd}(j) - \left(\Delta T \sum_{j=0}^k \hat{v}_{sd}(j) - \sum_{j=0}^k \Delta x_d(j) \right) \\ &= \Delta T \sum_{j=0}^k (\hat{v}_{sd}(j) + \beta(j)f_s(j)) \\ &\quad - \Delta T \sum_{j=0}^k \hat{v}_{sd}(j) + \sum_{j=0}^k \Delta x_d(j) \\ &= \Delta T \sum_{j=0}^k \beta(j)f_s(j) + \sum_{j=0}^k \Delta x_d(j).\end{aligned}$$

[0104]

[0105] 상기 수학식 19에서, 제 2 모듈 측의 수동성 제어기가 활성 상태이고 시간 지연이 가변이면, 위치 드리프트가 축적됨을 알 수 있다. 즉, 제 2 모듈 측에서 수동성을 만족하는 대신에 위치 드리프트가 축적될 수 있다.

[0106] 또한, 지연된 제 2 모듈 측에서 제어되는 힘이 피드백 힘으로 되돌아가기 때문에, 축적된 위치 드리프트는 또한 제 1 모듈 측에 피드백된 힘에도 영향을 미칠 수 있다.

[0107] 이상적인 피드백 힘은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

수학식 20

$$\hat{f}_{m,ideal}(k) = \hat{f}_{s,ideal}(k - T_b) = K_p(\hat{x}_{sd} - x_s)$$

[0108]

[0109] 하지만, 위치 드리프트 때문에, 통신 채널을 통해 전송된 피드백 힘은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

수학식 21

$$\begin{aligned}\hat{f}_m(k) &= K_p(\hat{x}_{sd} + x_{err} - x_s) \\ &= \hat{f}_{m,ideal}(k) + K_p x_{err}(k - T_b)\end{aligned}$$

[0110]

[0111] 제 1 모듈 측의 수동성 제어기는 임피던스 인과성을 갖고, 지연된 힘 $\hat{f}_m$ 에 대해 에너지를 소모하도록 수정할 수 있다. 따라서, 피드백된 힘의 총 감쇠는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

수학식 22

$$\begin{aligned} f_{err}(k) &= f_m(k) - \hat{f}_{m,ideal}(k) \\ &= f_m(k) - \hat{f}_m(k) + K_p x_{err}(k - T_b) \end{aligned}$$

[0112]

수학식 23

$$f_{err}(k) = \alpha(k)v_m(k) + K_p x_{err}(k - T_b)$$

[0113]

[0114] 따라서, 제 1 모듈 측의 수동성 제어기와 제 2 모듈 측의 수동성 제어기 모두는 제 2 모듈 측으로부터 피드백된 힘을 감쇠시키는 효과를 가질 수 있다. 상기 $K_p x_{err}(k - T_b)$ 는, 동일한 피드백 힘의 양을 생성하기 위해 움직임이 더 필요할 때, 제 1 모듈 측에서의 감각 강도를 더 낮추는 효과를 가질 수 있다. 또한, 상기 $\alpha(k)v_m(k)$ 로부터 유도된 댐핑은, 제 2 모듈 측에서 단단한 접촉이 일어났을 때, 제 1 모듈 측에서 약한 느낌을 발생시킬 수 있다. 따라서, 시간 영역 수동성 기법을 통해 수동성을 강화하는 대신에, 제 1 모듈과 제 2 모듈 사이의 위치 드리프트가 축적되고, 제 2 모듈 측에서의 단단한 접촉 동안 제 1 모듈 측에 피드백된 힘이 감소될 수 있다.

[0115] 시간 영역 수동성 기법에서의 성능 감소는 수동성 제어기들이 통신 채널에 의해 생성된 에너지를 방출하는 경우에, 위치 드리프트 및 피드백된 힘의 감쇠의 형태로 나타날 수 있다. 하지만, 통신 채널이 항상 에너지를 생성하는 것은 아니며, 통신 채널의 제 1 모듈 또는 제 2 모듈 측 포트들이 수동적이며 에너지를 소모할 수 있다. 통신 채널에서 이러한 수동성 초과에 경우에 에너지를 주입하여 수동성 제어기의 교정으로 인한 성능 감소를 카운팅할 수 있다. 이하, 가상 종속 에너지원이 어떻게 상기 성능 감소를 카운팅하는지에 대해 검토한다.

[0116] 우선, 위치 드리프트 보상에 대해 먼저 살펴보면, 통신 채널의 제 2 모듈 측 포트는 어드미턴스 인과성을 갖고, 따라서 추가적인 에너지 주입은 속도 신호를 수정함으로써 달성될 수 있다. 전기 네트워크 표현에서, 추가 속도 신호 발생기를 회로 상에 종속 전류원으로 모델링할 수 있고, 따라서, 추가 속도 신호 발생기의 속도 신호의 크기는 종속 전류원의 전류 값으로 모델링 될 수 있다. 회로 상에서, 종속 전류원은 에너지(예컨대, 추가 속도 신호)를 주입하며, 상기 종속 전류원의 전류 값은 위치 드리프트에 의해 결정될 수 있다. 본 명세서에서 제안하는 종속 전류원은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

수학식 24

$$v_{ad}(k) = \frac{1}{\Delta T} \text{sat}_{\delta} \left(\hat{x}_{sd}(k) - \Delta T \sum_{j=0}^{k-1} v_{sd}(j) - \hat{v}_{sd}(k) \Delta T \right)$$

[0117]

[0118] 여기서, 상기 $v_{ad}(k)$ 는 종속 전류원으로 모델링된 추가 속도 신호 발생기의 전류 값이며, 상기 ΔT 는 샘플링 기간이며, 상기 sat_{δ} 는 $\pm \delta$ ($\delta \geq 0$)의 한계값을 갖는 포화 함수이며, 상기 $\hat{x}_{sd}(k)$ 는 제 2 모듈에서 지연된 위치이며, 상기 $v_{sd}(j)$ 는 제 2 모듈의 원하는 속도이며, 상기 $\hat{v}_{sd}(k)$ 는 제 2 모듈에서 지연된 속도이다.

[0119] 이러한 추가 속도 신호 발생기는 제 2 모듈 측의 수동성 관찰기 및 수동성 제어기의 동작 이전에 또는 이후에

위치할 수 있는바, 이하, 도 7을 통해 본 발명의 일 실시예에 따라 제 2 모듈 측 수동성 관찰기 및 수동성 제어기의 동작 이전에 또는 이후에 추가 속도 신호 발생기를 통해 위치 드리프트를 보상하는 구성에 대하여 구체적으로 살펴본다.

[0120] 도 7a를 참조하여, 수동성 관찰기 및 수동성 제어기의 동작 이전의 드리프트 보상에 대해 살펴보면, 이러한 드리프트 보상 방식에서, 제 2 모듈 측의 수동성 관찰기 및 수동성 제어기의 동작 이전에 추가적인 에너지가 주입될 수 있다. 하지만, 주입된 에너지는 제 2 모듈 측의 수동성 관찰기 및 수동성 제어기에 의해 항상 제한되고, 이는 시스템의 수동성을 강화시킬 수 있다. 이러한 방식은 수동성을 항상 확실하게 하지만, 제 1 모듈로의 피드백 힘 신호가 또한 수정될 수 있고, 이는 자유 공간 움직임의 느낌에 영향을 미칠 수 있다. 즉, 단일 시간 동안 과도한 위치 드리프트 보상으로 인해 갑작스러운 힘 변화를 발생시킬 수 있다. 따라서, 피드백 힘을 과도하게 수정하는 것을 방지하기 위해서, 일정 시간 간격에서 허용되는 드리프트 보상의 양을 제한할 수 있다. 즉, $\delta = 0$ 일 경우에는 드리프트 보상을 하지 않고, $\delta \rightarrow \infty$ 일 경우에는 드리프트 보상을 최대로 하며, $0 < \delta < \infty$ 일 경우에는 드리프트 보상을 제한적으로 할 수 있다.

[0121] 도 7b를 참조하여, 수동성 관찰기 및 수동성 제어기의 동작 이후의 드리프트 보상을 살펴보면, 이 방식에서는 추가적인 전류가 피드백 힘에 영향을 미치지 않고, 더 매끄러운 힘의 느낌이 획득될 수 있다. 하지만, 수동성 관찰기 및 수동성 제어기의 동작 이후에 에너지 주입이 발생하기 때문에, 수동성이 보장되지 않는다. 주입된 에너지는 제 2 모듈 제어기, 제 2 모듈 및 원격 환경에 나타난 댐핑에 의해 소모되어야 한다. 따라서, 이 방식으로는, 시스템의 수동성이 항상 보장되지 않으며, 제어기 파라미터, 장치 특성 및 원격 환경 조건에 따라 조건적이다.

[0122] 이하, 제 2 모듈 측의 수동성 관찰기 및 수동성 제어기 이전에 추가 속도 신호 발생기(최대 보상, $\delta \rightarrow \infty$)를 통해 에너지를 주입하는 것이 어떻게 위치 드리프트를 보상하는지에 대해 살펴본다.

[0123] 상기 수학식 18을 이용하여, 상기 수학식 24를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

수학식 25

$$[0124] \quad v_{ad}(k) = \hat{v}_{sd}(k-1) + v_{ad}(k-1) - v_{sd}(k-1) - \Delta x_d(k)/\Delta T$$

[0125] 또한, 도 7a를 참조하면, 상기 수학식 12를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

수학식 26

$$[0126] \quad v_{sd}(k) = \hat{v}_{sd}(k) + v_{ad}(k) + \beta(k)f_s(k)$$

[0127] 또한, 상기 수학식 25 및 상기 수학식 26을 종합하면, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

수학식 27

$$[0128] \quad v_{ad}(k) = -\beta(k-1)f_s(k-1) - \Delta x_d(k)/\Delta T$$

[0129] 따라서, 상기 수정된 위치 명령 신호는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

수학식 28

$$\begin{aligned}
 x_{err}(k) &= x_{sd}(k) - \hat{x}_{sd}(k) \\
 &= \Delta T \sum_{j=0}^k v_{sd}(j) - \left(\Delta T \sum_{j=0}^k \hat{v}_{sd}(j) - \sum_{j=0}^k \Delta x_d(j) \right) \\
 &= \Delta T \sum_{j=0}^k (\hat{v}_{sd}(j) + v_{ad}(j) + \beta(j)f_s(j)) \\
 &\quad - \Delta T \sum_{j=0}^k \hat{v}_{sd}(j) + \sum_{j=0}^k \Delta x_d(j) \\
 &= \Delta T \beta(k) f_s(k).
 \end{aligned}$$

[0130]

[0131]

따라서, 상기 수학식 19와 상기 수학식 28을 비교하면, 시변 지연 또는 제 2 모듈 측 수동성 제어기의 교정 때문에 위치 드리프트가 더 이상 축적되지 않음을 알 수 있다. 제 2 모듈 측의 수동성 제어기가 비활성 ($\beta(k)=0$)이면, 위치 드리프트 $x_{err}(k)$ 는 0이 된다. 이 분석은 큰 δ 에 대해 수행된 것이며, 각 시간마다 최대 보상이 적용될 수 있다. 만약 δ 가 크지 않으면, 위치 드리프트는 각 시간에서 취소될 수 있지만, 오히려 계속된 동작의 기간에 걸쳐 보상받을 수 있다.

[0132]

이하, 도 8을 통해 본 발명의 일 실시예에 따라 제 1 모듈 측의 추가 힘 신호 발생기를 통해 힘을 보상하는 구성에 대하여 구체적으로 살펴본다.

[0133]

도 8을 참조하면, 위치 드리프트 보상 방식과 유사하게, 그리고 제 1 모듈 측의 통신 채널에 의해 허용된 수동성 마진(margin)에 따라, 종속 에너지원으로 추가 에너지를 주입하여 제 2 모듈로부터 피드백되는 힘을 높일 수 있다. 즉, 통신 채널의 제 1 모듈 측 포트가 임피던스 인과성을 갖기 때문에, 전기 네트워크 표현에서, 추가 힘 신호 발생기를 회로 상에 종속 전압원으로 모델링할 수 있고, 따라서, 추가 힘 신호 발생기의 힘 신호의 크기는 종속 전압원의 전압 값으로 모델링 될 수 있다. 본 명세서에서 제안하는 종속 전압원은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

수학식 29

$$f_{ad}(k) = \begin{cases} K_f(x_s(k-T_b) - x_m(k)), & \text{if } |x_s(k-T_b) - x_m(k)| > \gamma \\ 0, & \text{else} \end{cases}$$

[0134]

[0135]

여기서, 상기 $f_{ad}(k)$ 는 종속 전압원으로 모델링되는 추가 힘 신호 발생기의 전압 값이며, 상기 $x_s(k-T_b)$ 는 제 2 모듈에서 지연된 위치이며, 상기 $x_m(k)$ 는 제 1 모듈의 현재 위치이며, 상기 K_f 는 상기 $x_s(k-T_b)$ 와 상기 $x_m(k)$ 사이의 오차 상에서 적용되는 이득(gain)이며, 상기 $|x_s(k-T_b) - x_m(k)| > \gamma$ 는 제 2 모듈이 원격 환경과 실제로 접촉했는지를 감지하기 위한 조건이다.

[0136]

상기 $|x_s(k-T_b) - x_m(k)| > \gamma$ 조건은, 제 2 모듈이 원격 환경과 실제로 접촉했는지를 감지하는 간접적인 방법일 수 있다. 만약 제 2 모듈이 자유 공간에 있으면, 힘을 보상할 필요가 없다. 본원 발명은 접촉을 감지할 임의의 추가 정보를 갖지 않으므로, γ 보다 큰 위치 에러는 접촉이 발생했다는 것을 의미할 수 있다. γ 에 대한 힘 보상의 의존성을 제거하는 방법은, 제 2 모듈 측에 힘 센서 또는 근접성 센서를 연결하여 실제 접촉을 감지한 후에 힘 보상을 개시하는 것일 수 있다.

- [0137] 이하, 도 9를 통해 본 발명의 일 실시예에 따라 제 1 모듈 또는 제 2 모듈 측에 연결된 시간 지연 전력 네트워크에 대하여 구체적으로 살펴본다.
- [0138] 수동성 분석은 보통의 시간 영역 수동성 기법 기반 제어와 유사하지만, 약간의 수정을 통해, 시간 지연 전력 네트워크를 수동화시키고, 추가적인 에너지원들을 함께 결합시킬 수 있다.
- [0139] 즉, 도 9a를 참조하면, 제 1 모듈 측에 연결된 시간 지연 전력 네트워크는 종속 전압원으로 모델링된 추가 힘 신호 발생기가 연결되고, 일정 범위 이상에서만 힘 보상을 하도록 데드밴드를 가질 수 있다.
- [0140] 또한, 도 9b를 참조하면, 제 2 모듈 측에 연결된 시간 지연 전력 네트워크는 종속 전류원으로 모델링된 추가 속도 신호 발생기가 연결되고, 일정 범위 내에서만 위치 보상을 하도록 제한할 수 있다.
- [0141] 이제, 제 1 모듈 측의 에너지와 제 2 모듈 측의 에너지는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

수학식 30

$$E^M(k) = \Delta T \sum_{j=0}^k (f_{ad}(j) + \hat{f}_m(j)) v_m(j)$$

$$E^S(k) = \Delta T \sum_{j=0}^k f_s(j) (\hat{v}_{sd}(j) + v_{ad}(j))$$

[0142]

- [0143] 이하, 도 10을 통해 듀얼 PHANTOM 원격제어 장치를 이용한 테스트에 대하여 구체적으로 살펴본다.
- [0144] 도 10을 참조하면, 1kHz의 샘플링 레이트의 동일한 컴퓨터를 이용하여 제어되는 두 개의 PHANTOM Premium 1.5 장치를 이용하여 여러 테스트들이 수행되었고, 통신 지연은 소프트웨어로 구현되었다. 위치-힘 양방향 제어 구조는, 제 1 모듈(MASTER)로 피드백된 힘으로서 사용된, 지연된 제 2 모듈(SLAVE)의 제어되는 힘을 갖고, 제 2 모듈로 하여금 제 1 모듈의 위치 명령을 따르게 하는 제 2 모듈 측의 위치 제어를 갖는다. 다양한 통신 지연 조건들은 다음의 표 1과 같다.

표 1

통신 지연 조건들

통신 지연 조건	왕복 지연, T_{rt}
일정한 작은 지연	200 ms
일정한 큰 지연	1000 ms
가변 지연	100 - 300 ms (평균 200 ms)
가변 지연 + 통신 불능	2000 ms 통신 불능을 갖는 100 - 300 ms (평균 200 ms)

[0145]

- [0146] 또한, 제 1 모듈 측에 수동적 가상 질량-스프링 시스템이 구현되어, 제 1 모듈 측의 수동성 제어기 동작에 의한 고주파 힘의 변동을 방지할 수 있다. 이러한 가상 질량-스프링 시스템은 양방향 필터로 동작하여, 제 1 모듈 측에 작용하는 갑작스러운 힘의 변화를 완충하고, 사용자에게 저주파 성분만을 전달할 수 있다. 또한, 가상 질량-스프링 시스템은 제 1 모듈에서 제 2 모듈로 전송되는 속도 신호를 필터링하여, 상기 제 2 모듈에 저주파 성분을 전달할 수 있다. 테스트에서 사용된 가상 질량은 0.0001 kg이고, 가상 스프링 강성은 1000 N/m이다.
- [0147] 테스트에서 사용된 회로를 나타내면 도 11과 같다. 도 11은, 제 2 모듈 측에서의 위치 보상과 수동성 관찰기 및 수동성 제어기의 동작, 그리고 제 1 모듈 측에서의 가상 질량-스프링 시스템을 갖는 힘 보상과 수동성 관찰기 및 수동성 제어기의 동작을 모두 수행하는 원격제어 네트워크를 나타낸다.
- [0148] 몇몇의 제어 설계들이 아래의 표 2와 같은 위치 드리프트 및 힘 보상기들(예컨대, 추가 속도 신호 발생기 및 추가 힘 신호 발생기)의 여러가지 조합으로 구현될 수 있다. 이 중에서 PDC_B_PC_FC의 제어 설계가 자유 공간 동

작, 단단한 벽과의 접촉, 및 표 1의 다양한 통신 지연의 조건 하에서 테스트되었다.

표 2

제어 설계의 비교 목록

제어 설계	약어
보통의 TDPA	PC
PC 이전의 위치 드리프트 보상기 (최대 보상)	PDC_B_PC
PC 이전의 위치 드리프트 보상기 (제한된 보상)	PDCb_B_PC
PC 이후의 위치 드리프트 보상기	PDCb_A_PC
힘 보상기	FC
PC 이전의 위치 드리프트 보상기 (최대 보상) 및 힘 보상기	PDC_B_PC_FC
PC 이전의 위치 드리프트 보상기 (제한된 보상) 및 힘 보상기	PDCb_B_PC_FC

[0149]

[0150] 테스트에서 사용된 제 1 모듈과 제 2 모듈 사이의 Steady State Error(SSE)는 양방향 원격제어 동안 발생할 수 있는 위치 드리프트가 축적된 양을 나타낼 수 있다. 또한, 제 1 모듈과 제 2 모듈 사이의 Root Mean Square Error(RMSE)는 원격제어 동안의 위치 추적 성능을 나타낼 수 있다.

[0151] 이하, 도 12와 도 13을 비교하여, 보통의 시간 영역 수동성 기법을 이용한 양방향 원격제어에 비해 본 명세서에서 제안하는 양방향 원격제어의 개선된 효과를 구체적으로 살펴본다.

[0152] 참고로, 도 12의 테스트는 가변 시간 지연 하에서 보통의 시간 영역 수동성 기법으로 단단한 접촉 조건에서 수행된 것이고, 도 13의 테스트는 가변 시간 지연 하에서 PDC_B_PC_FC의 설계 조건으로 수행된 것이다.

[0153] 도 12a와 도 13a를 비교하면, 제 1 모듈과 제 2 모듈 사이의 위치 추적이 상당히 개선되었고, 도 13a에는 SSE가 없음을 알 수 있다.

[0154] 또한, 도 12b와 도 13b를 비교하면, 원격 환경으로의 유사한 삽입 크기에 대하여, PDC_B_PC_FC의 설계 조건에서 제 1 모듈에 피드백된 힘이 보통의 시간 영역 수동성 기법의 조건에서 제 1 모듈에 피드백된 힘보다 더 큰 것을 알 수 있다. 또한, 도 13b를 도 12b와 비교하면, 위치 드리프트 보상기에 의해 접촉 동안 힘이 점점 증가하는 경향을 나타낸다. 이러한 경향은 제 2 모듈이 물체를 이동시키고, 제 1 모듈과 제 2 모듈 장치 사이의 위치를 동기화하기 위해 힘을 점점 증가시키기 때문에 나타나는 경향으로서, 본 발명의 일 실시예에 따른 PDC_B_PC_FC 설계 조건은 정교한 업무에 유용할 수 있다. 또한, 제 2 모듈이 손상되기 쉬운 원격 환경들과 접촉할 때, 상기 원격 환경들에 대한 손상을 방지하기 위해 제 2 모듈의 힘은 특정 포화 값으로 제한될 수 있다.

[0155] 이하, 도 14를 통해 본 발명의 일 실시예에 따라 상이한 통신 지연 조건들 하에서 구현되고, 자유 공간 움직임을 수행하는 제어기들의 SSE 및 RMSE에 대하여 구체적으로 살펴본다.

[0156] 도 14를 참조하면, 드리프트 보상(최대 또는 제한된 보상)을 포함하는 설계는 모두 보통의 시간 영역 수동성 기법보다 SSE 및 RMSE 측면에서 우수한 성능을 갖는 것을 확인할 수 있다. PDC_A_PC 제어 설계를 제외하고, 드리프트 보상을 갖는 모든 제어 설계들이 거의 0의 SSE 값을 갖는다. RMSE는 대체로 SSE의 경향을 따르는데, 가변 지연+통신 불능 조건에서 PDC_A_PC가 PC_FC보다 더 높은 RMSE를 갖는 것을 확인할 수 있다. 이는 통신 불능 이전에 또는 이후에 제 1 모듈과 제 2 모듈의 상대적인 위치들의 차이 때문일 수 있다.

[0157] 이하, 도 15를 통해 본 발명의 일 실시예에 따라 상이한 통신 지연 조건들 하에서 구현되고, 단단한 접촉(hard contact)시의 상호작용을 수행하는 제어기들의 SSE에 대하여 구체적으로 살펴본다.

[0158] 도 15를 참조하면, 드리프트 보상을 포함하는 설계들이 드리프트 보상을 포함하지 않은 설계보다 SSE 측면에서 훨씬 더 우수한 성능을 갖는 것을 확인할 수 있다. 힘 보상만을 추가한 것(PC_FC)이 보통의 시간 영역 수동성

기법(PC)보다 더 낮은 SSE 성능을 보이기도 하였는데, 이는 시스템 내에 추가된 에너지가 보통의 시간 영역 수동성 기법(PC)보다 더 긴 시간 동안 제 2 모듈 측의 수동성 제어기의 활성화를 야기시키고, 따라서 더 큰 위치 드리프트를 축적시킨 것 때문일 수 있다.

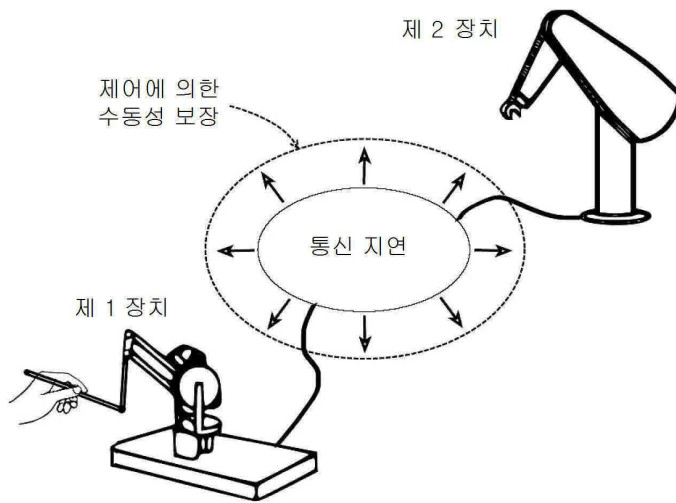
[0159] 이하, 도 16을 통해 본 발명의 일 실시예에 따라 상이한 통신 지연 조건들 하에서 구현되고, 단단한 접촉시의 상호작용을 수행하는 제어기들의 감각 강도(Perceived stiffness)의 값들에 대하여 구체적으로 살펴본다.

[0160] 도 16을 참조하면, 감각 강도의 값들은 모든 조건에서, 보통의 시간 영역 수동성 기법보다, 위치 보상 또는 힘 보상을 갖는 설계들이 보다 더 강한 접촉을 제공하는 것을 확인할 수 있다. 가장 강한 감각 강도를 갖는 것이 PDC_B_PC_FC와 PDC_A_PC인데, 수동성을 보장하기 위해, PDC_B_PC_FC 설계 방식을 선택하는 것이 바람직할 수 있다.

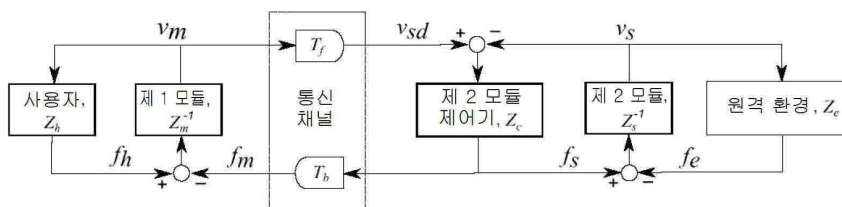
[0161] 위에서 설명된 본 발명의 실시 예들은 예시의 목적을 위해 개시된 것이며, 이들에 의하여 본 발명이 한정되는 것은 아니다. 또한, 본 발명에 대한 기술 분야에서 통상의 지식을 가진 자라면 본 발명의 사상과 범위 안에서 다양한 수정 및 변경을 가할 수 있을 것이며, 이러한 수정 및 변경은 본 발명의 범위에 속하는 것으로 보아야 할 것이다.

도면

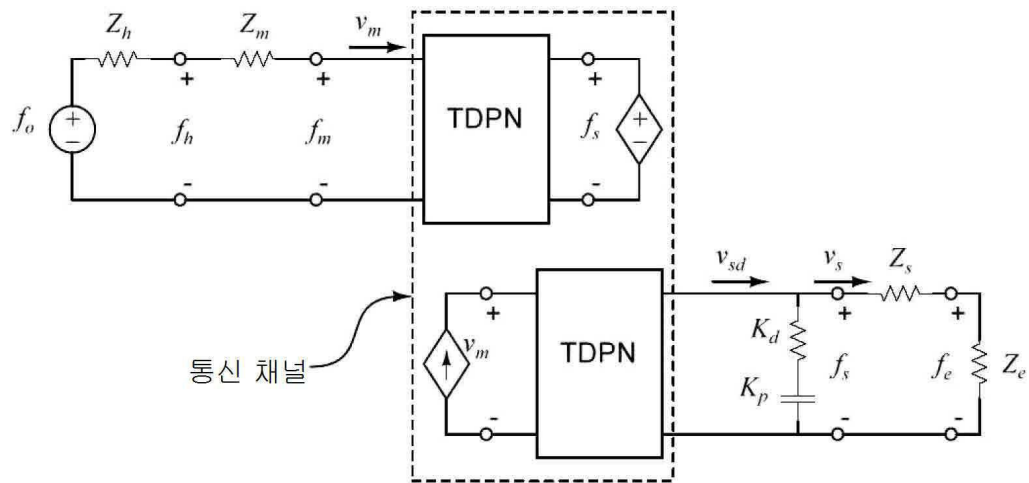
도면1



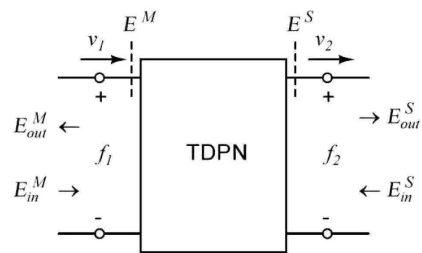
도면2



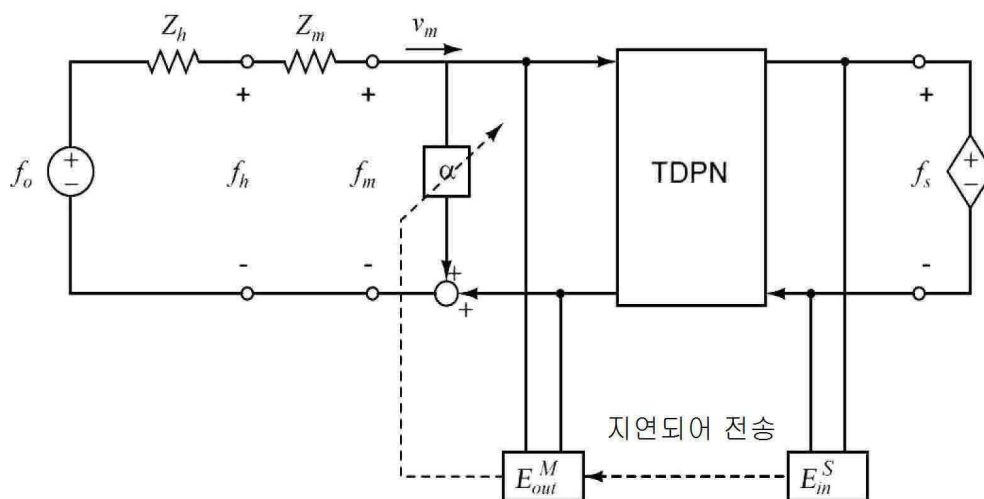
도면3



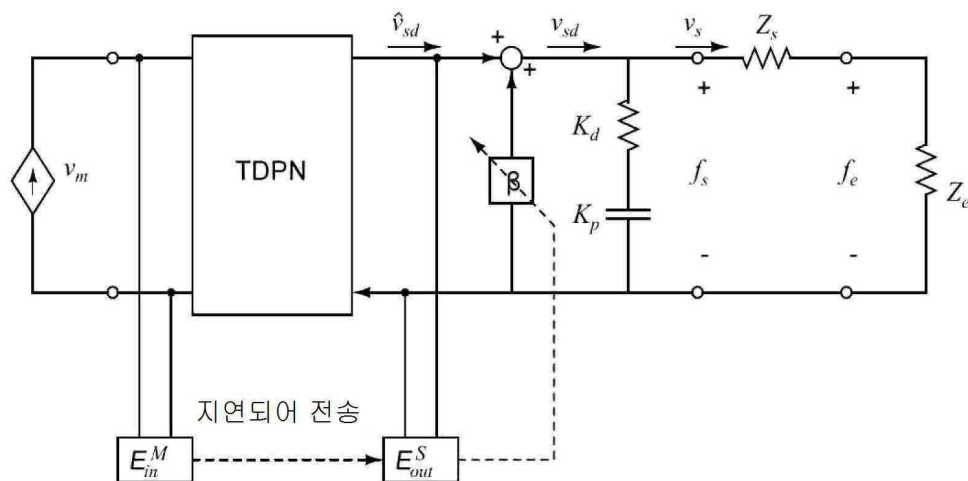
도면4



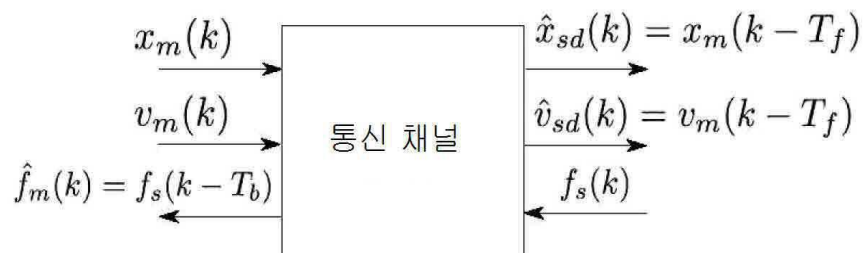
도면5a



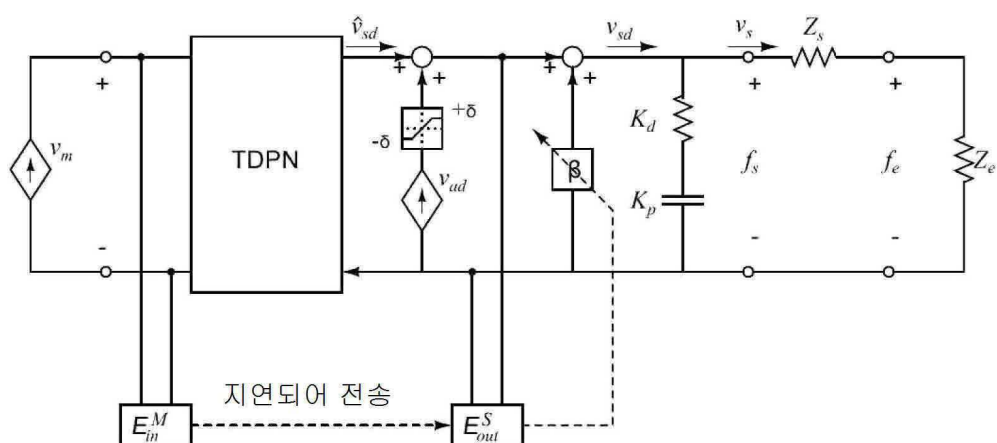
도면5b



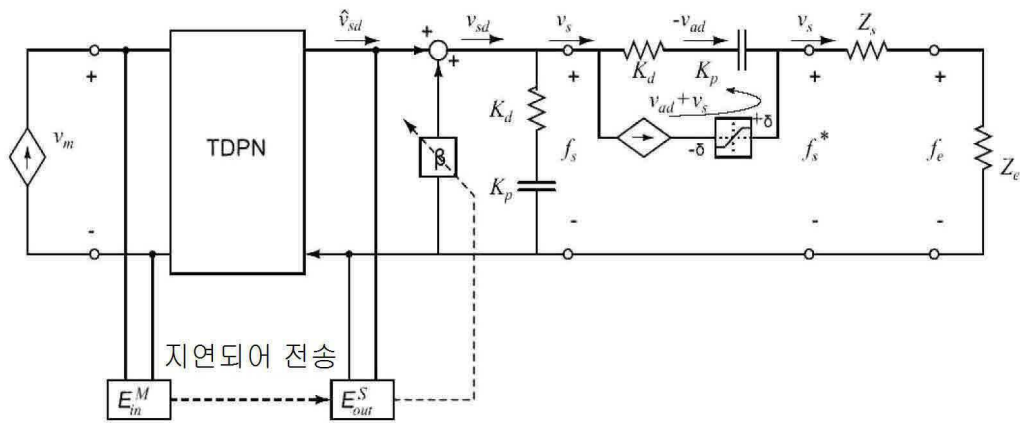
도면6



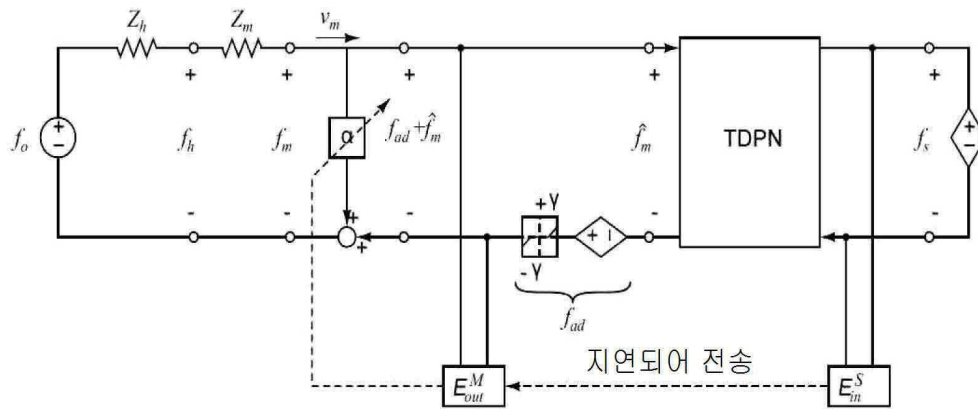
도면7a



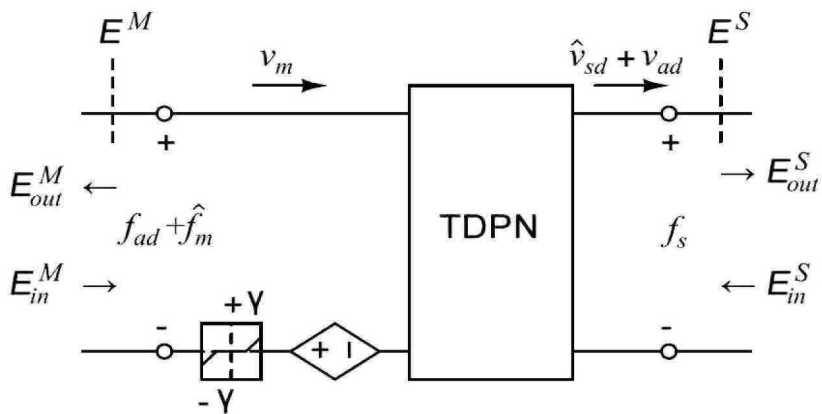
도면7b



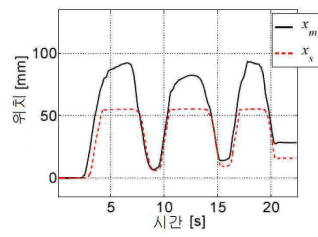
도면8



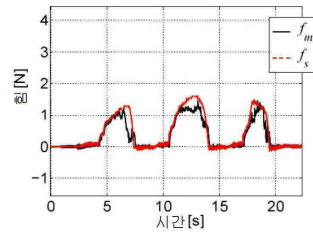
도면9a



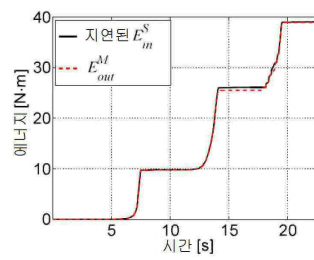
도면12a



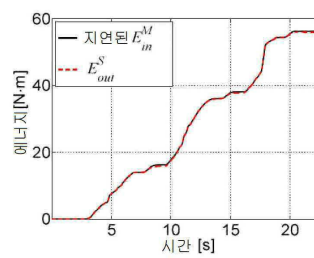
도면12b



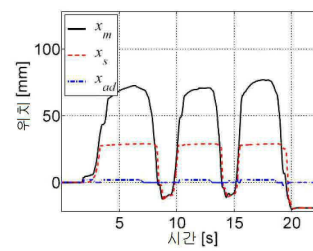
도면12c



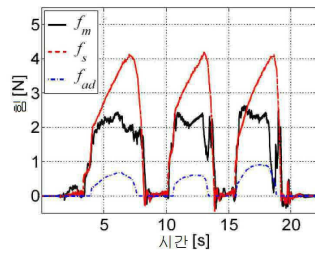
도면12d



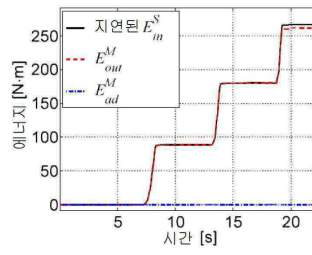
도면13a



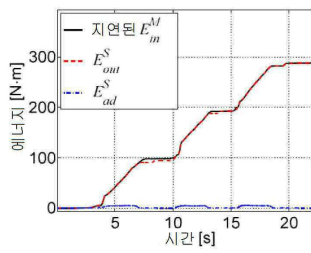
도면13b



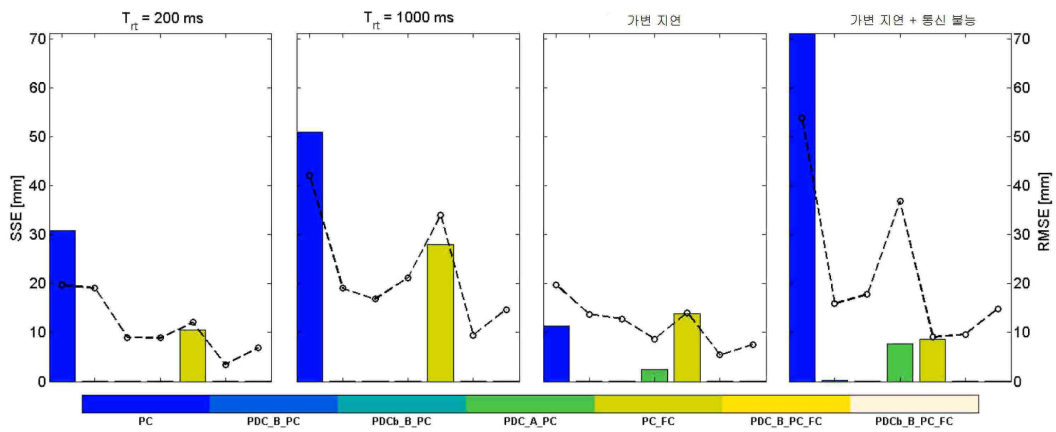
도면13c



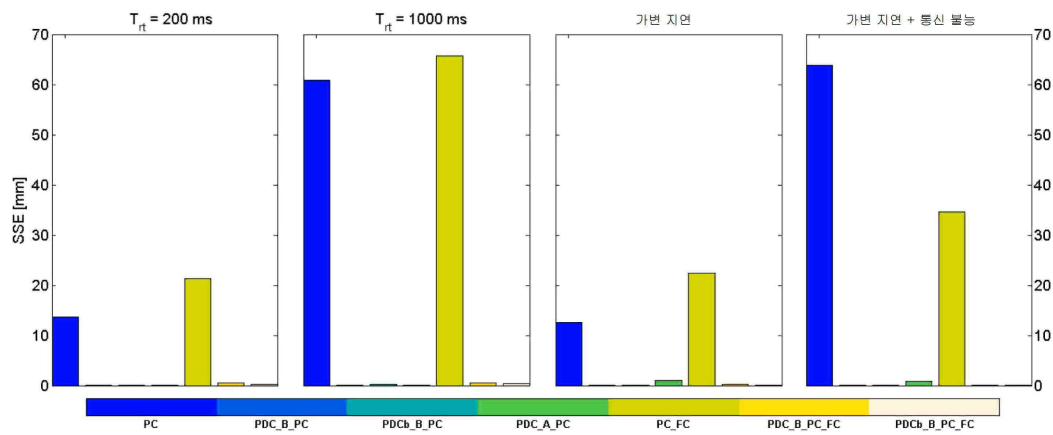
도면13d



도면14



도면15



도면16

