웨이브 변수의 가변 특성 임피던스를 이용한 시간지연을 갖는 양방향 원격조작시스템의 안정화 제어 방법

A Stabilizing Control technique for Bilateral Teleoperation System with Time delay using Adjustable Characteristic Impedance of Wave Variable

김 형 욱, 김 종 복, 서 일 홍, 이 병 주
(Hyung Wook Kim, Jong Bok Kim, Il Hong Suh, and Byung-Ju Yi)

Abstract : A hybrid stabilization approach involving both Passivity Observer/Passivity Controller and wave variables is addressed to stabilize the teleoperation system with time delay. To guarantee the stability of master or slave side, Passivity Observer and Passivity Controller are applied. But, Passivity Observer and Passivity Controller technique cannot deal with communication delay and even small communication delay cause the system to be unstable. To cope with this problem, wave variables are additionally employed to have robustness to arbitrary delays. To show the validity of our proposed approach, several computer simulation results are illustrated.

Keywords : teleoperation, wave variable, passivity, time delay

I. 서론

고전적인 의미에서의 로봇은 산업 현장에서 사람을 대신하여 힘들고 위험한 일을 수행하는 산업용 로봇이 주류를 이루었지만, 최근에는 산업현장 뿐만 아니라 인간에게 친밀하게 다가서고 있는 애완 로봇, 사람의 형태를 닮아가는 휴머노이드 로봇, 서비스 로봇, 극한 작업용 로봇과 같이 사회의 여러 분야에서 다양하게 사용되고 있다. 특히, 작업 절차가 복잡하고 돌발적인 상황이 많이 발생하는 곳에서 사용 되는 로봇들은 기술이 발달하고 성능이 많이 향상 되었다고는 하지만 순간순간 변하는 상황에 대처하기 힘들기 때문에 작업자가 직접 조작을 하게 되는 로봇들로서 우주 공간에서의 작업, 원자로 내의 작업, 심해저에서의 작업, 광산이나 지하, 붕괴된 건물 속에서의 작업 등이 그러한 로봇의 적용 예이다. 극한 작업들에 필요한 로봇을 투입하고 작업자는 원거리에서 이 로봇들을 조작한다면 위험한 상황이나 돌발적인 상황이 발생하여도 작업자가 안정성을 확보하면서 능동적으로 대처할 수 있다는 장점이 있다.

원격조작시스템은 그림 1과 같은 블록도로 나타낼 수 있는데 일반적으로 주로봇, 종로봇 그리고 통신 채널로 구성된다. 주로봇은 작업자의 조작을 직접적으로 받아서 종로봇에 보낼 명령을 생성하고, 종로봇은 주로봇으로 부터 받은 명령을 추종하게 된다. 주로봇의 명령을 추종하는 동안 종로봇은 현재의 종로봇의 위치나 접촉시의 힘 등을 주로봇에 알려주어 작업자가 작업환경을 느낄 수 있도록 한다. 원격조작시스템이 안정적으로 작동하기 위해서는 주로봇, 종로봇 그리고 통신 채널이 모두 안정해야 하지만, 주로봇이나 종로봇이 불안정하거나 통신 채널에 시간 지연이 존재하면 전체 시스템이 불안정해지게 된다.

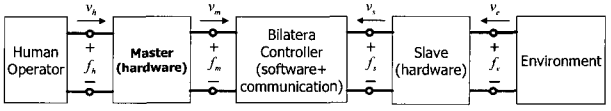


그림 1. 2단자 네트워크 모델로 표현된 원격조작시스템.
Fig. 1. 2-port network model of teleoperation system.

원격조작시스템의 해석 및 안정화에 관한 연구로 H. Zaad와 Salcudean은 [2, 3]에서 전달되는 데이터의 종류에 따라 모드를 나누고 각각의 경우에 대한 안정도 조건과 성능을 분석하였다. Hannaford와 Ryu는 [4, 5]에서 네트워크 시스템을 불안정하게 하는 에너지의 흐름을 관측하고, 소모시켜 안정화하도록 하는 시간영역에서의 수동성 관측기/제어기를 제안하였지만, 통신 채널에 존재하는 시간 지연에 대한 해결방법은 제시하지 않았다. Niemeyer와 Slotine은 [6-8]에서 통신 채널에 시간 지연이 존재하더라도 원격조작시스템을 안정화하도록 웨이브 변수를 도입하였는데, 웨이브 기반 원격조작시스템의 성능과 특성 임피던스 b가 성능 및 안정성에 미치는 영향에 대한 해석이 없었다.

따라서, 본 논문에서는 원격조작시스템의 주로봇단 또는 종로봇단에 불안정 요소가 있거나 통신 채널에 시간 지연이 존재하더라도 안정성을 확보하기 위하여 수동성 제어기와 웨이브 변수를 함께 적용하는 혼합 방법을 제안하고자 한다. 수동성 제어기는 네트워크 시스템에서 이동하는 에너지의 양을 관측하면서 시스템이 불안정해지면 시스템을 불안정하게 만드는 만큼의 에너지를 소모시켜 전체 시스템이 계속 안

* 책임저자(Corresponding Author)
논문접수 : 2003. 3. 13., 채택확정 : 2003. 6. 20.
김형욱, 이병주 : 한양대학교 전자컴퓨터공학부
(hwkim@incorl.hanyang.ac.kr/bj@hanyang.ac.kr)
김종복, 서일홍 : 한양대학교 정보통신대학원
(jbkim@incorl.hanyang.ac.kr/ihsuh@ hanyang.ac.kr)
※ 본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R01-2000-000-00260-0(2002)) 지원으로 수행되었음.

정한 상태를 유지하도록 보장한다[4, 5]. 한편, 통신 채널에 시간 지연이 존재할 경우에는 수동성 제어기를 사용하더라도 원격조작시스템의 안정성을 보장할 수 없으므로, 통신 채널에 시간 지연이 존재하더라도 안정성을 보장해 줄 수 있는 웨이브 변수를 도입한다[6-8]. 즉, 주로봇 또는 종로봇단의 안정성은 수동성 제어기를 사용하여 보장하게 하고, 통신 채널에 시간 지연이 존재할 경우의 안정성은 웨이브 변수를 사용하여 전체 시스템의 안정성을 보장하도록 한다. 또한, 종로봇에서 조작자쪽으로 전달되는 임피던스의 최소값[9]를 구하여 웨이브 변수를 사용했을 때의 성능을 분석하였다. 일반적으로 Z-width는 햅틱장치가 표현할 수 있는 임피던스의 범위로 햅틱장치의 성능을 표현할 때 사용되는 용어이며 최소값은 작을수록, 범위는 넓을 수록 햅틱장치의 성능이 좋다고 알려져 있다. 한편, 원격조작시스템의 경우에는 조작자로의 전달 임피던스와 환경의 임피던스가 같을 때 투명하다고 할 수 있으며, 자유공간의 경에는 환경의 임피던스가 0이므로 전달 임피던스의 크기가 작아질 수록 투명해진다고 할 수 있다. 따라서, 본 논문에서는 원격조작시스템의 성능 분석에 전달 임피던스의 최소값을 사용하고자 한다.

II. 웨이브(wave) 변수

1. 정의

웨이브 변수는 파워 변수인 속도 $\dot{x}$과 힘 F의 정보를 인코딩한 값으로 나타내며 정의는 (1)과 같다.

$$u=\frac{b\dot{x}+F}{\sqrt{2b}},\ v=\frac{b\dot{x}-F}{\sqrt{2b}} \tag{1}$$

여기서, u는 오른쪽 방향으로 흐르는 웨이브, v는 왼쪽 방향으로 흐르는 웨이브, b는 웨이브의 특성 임피던스를 나타낸다.

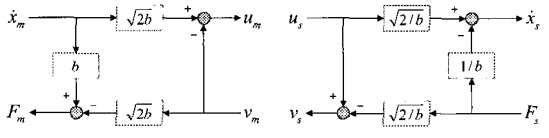
(1)을 이용하여 주로봇단에서의 u_m, F_m과 종로봇단에서의 v_s, $\dot{x}_s$에 관하여 정리하면 (2), (3)과 같다.

$$u_m=\sqrt{2b}\dot{x}_m-v_m,\ F_m=b\dot{x}_m-\sqrt{2b}v_m \tag{2}$$

$$v_s=u_s-\sqrt{\frac{2}{b}}F_s,\ \dot{x}_s=\sqrt{\frac{2}{b}}u_s-\frac{F_s}{b} \tag{3}$$

여기서, $\dot{x}_m$은 주로봇의 속도, $\dot{x}_s$은 종로봇의 속도명령, F_m은 궤환 힘신호, F_s는 측정된 종로봇의 힘을 의미한다.

(2), (3)을 이용하여 주로봇과 종로봇측에서 사용되는 웨이브 변환을 구성해보면 그림 2와 같고, 웨이브 변수로 표현된 양방향 원격조작시스템의 전체 구조는 그림 3과 같다.



(a) 주로봇단 (b) 종로봇단

그림 2. 웨이브 변환 구조.

Fig. 2. Structure of wave transformation.

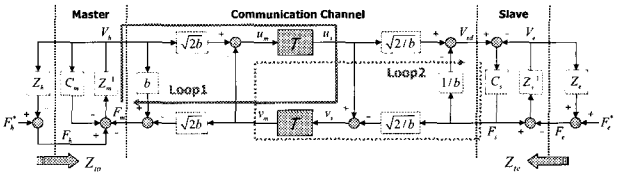


그림 3. 웨이브 변수 기반 원격조작시스템.

Fig. 3. Wave variable-based teleoperation system.

2. 안정성 평가

통신 채널의 파워 변수인 속도 $\dot{x}$과 힘 F의 값을 웨이브 변수의 형태로 변환하는 이유는 통신 채널에 시간 지연이 존재하더라도 수동성을 보장해주기 위한 것으로서, 통신 채널에서의 파워 흐름(power flow)은 웨이브 변수를 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$P_{flow}=\dot{x}^TF=\frac{1}{2}u^Tu-\frac{1}{2}v^Tv \tag{4}$$

여기서, 오른쪽으로 흐르는 파워 흐름을 양(positive)의 값을 갖도록 가정한다.

파워 플로우(power flow)를 파워 변수($\dot{x}$, F)의 곱의 형태로 나타낼 경우에는 임의의 순간에 파워플로우를 구하기 위하여 그 순간에서의 파워 변수 값들을 알아야 하지만, 그 두 값 사이에는 시간 지연이 존재하게 되어 물리적으로 의미가 없게 된다. 하지만, 웨이브 변수의 형태로 나타내게 되면 파워 플로우는 u와 v가 각각이 가지고 있는 값의 제곱의 형태가 되므로 시간 지연이 있더라도 지연된 시간만큼의 파워가 네트워크에 저장될 뿐 시간 지연에 의해 전체 시스템의 수동성을 깨뜨리지는 않는다. 즉, 양방향 원격조작시스템의 통신 채널에 시간 지연이 발생하여도 웨이브 변수의 형태로 나타내면 시간 지연에 강인함(robustness)을 가지게 된다.

시스템에 입력되는 에너지가 수동성을 유지하려면 다음의 조건을 만족하여야 한다.

$$\int_0 P_{in}d\tau\geq -E_{store}(0),\ \forall t\geq 0 \tag{5}$$

여기서, $E_{store}(0)$는 초기에 시스템에 저장된 에너지를 나타낸다. (5)를 웨이브 변수의 형태로 나타내면 다음과 같다.

$$\int_0\frac{1}{2}v^Tvd\tau\leq\int_0\frac{1}{2}u^Tud\tau+E_{store}(0),\ \forall t\geq 0 \tag{6}$$

여기서, u는 입력 웨이브이고, v는 출력 웨이브이다. 즉, 출력되는 웨이브 에너지는 초기에 저장된 에너지와 입력 웨이브 에너지의 합의 크기보다 작아야 함을 알 수 있다.

웨이브 변수가 통신 채널의 시간 지연에 강인함을 보이기 위하여 통신 채널에 입력되는 총 파워를 구해보면 다음과 같다.

$$P_{in}=\dot{x}_m^TF_m-\dot{x}_s^TF_s \tag{7}$$

여기서, 주로봇단으로부터 통신 채널로의 입력을 양(positive),

통신 채널에서 종로봇단으로의 출력은 음(negative)으로 가정한다.

(7)에 웨이브 변수를 대입하여 정리하면 (8)과 같다.

$$P_{in} = \frac{1}{2}u_m^T u_m - \frac{1}{2}v_m^T v_m - \frac{1}{2}u_s^T u_s + \frac{1}{2}v_s^T v_s \tag{8}$$

모든 변수들은 시간 t에서 측정된 값들이다.

통신 채널에 시간 지연 T가 존재하면 (9)의 관계가 성립하므로, 파워는 (9)를 (8)에 대입하여 정리하면 (10)과 같이 구해질 수 있다.

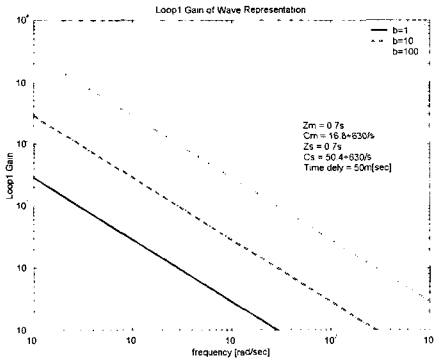
$$u_s(t) = u_m(t-T),\ v_m(t) = v_s(t-T) \tag{9}$$

$$\begin{aligned} P_{in} &= \frac{1}{2}u_m^T(t)u_m(t) - \frac{1}{2}u_m^T(t-T)u_m(t-T) + \\ &\frac{1}{2}v_s^T(t)v_s(t) - \frac{1}{2}v_s^T(t-T)v_s(t-T) \\ &= \frac{d}{dx}\left[\int_{t-T}^{t}\left(\frac{1}{2}u_m^T(\tau)u_m(\tau) + \frac{1}{2}v_s^T(\tau)v_s(\tau)\right)d\tau\right] \end{aligned} \tag{10}$$

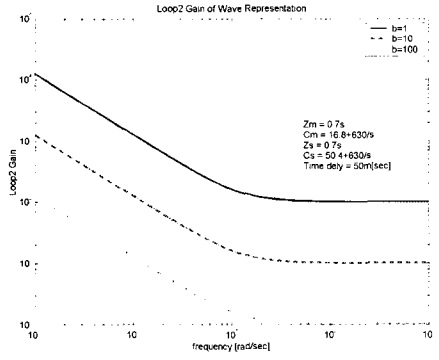
따라서, 통신 채널에 저장된 에너지는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_{store}(t) = \int_0^t P_{in}d\tau = \int_{t-T}^{t}\left(\frac{1}{2}u_m^T u_m + \frac{1}{2}v_s^T v_s\right)d\tau \geq 0 \tag{11}$$

네트워크에 시간 지연 T가 존재하더라도 그 만큼의 에너지가 통신 채널에 저장될 뿐 수동성 조건을 위배하지 않음을 알 수 있다.



(a) 루프1 이득



(b) 루프2 이득

그림 4. b값의 변화에 따른 루프 이득.

Fig. 4. Plot of loop gains with different b.

한편, 웨이브 변수의 특성 임피던스 b가 안정성에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 그림 3에서 루프1과 루프2의 이득을 각각 구해보면 (12)와 같다.

$$Loop1: \frac{2be^{-2sT}}{Z_m},\quad Loop2: \frac{2C_s e^{-2sT}}{b} \tag{12}$$

그림 4는 b값의 변화에 따른 루프 이득을 그린 그래프이다. 루프1과 루프2는 모두 양의 궤환(positive feedback)이고, b의 값에 따라 루프 이득을 그려보면 b의 값이 작을 때는 루프2의 이득값이 루프1의 이득값에 비해 매우 크므로 종로봇단을 안정화시키려면 루프2의 이득값을 줄이도록 b의 값을 증가시켜 주는 것이 좋다.

3. 웨이브 변수 기반 원격조작시스템의 성능 평가

그림 3의 구조에서 주로봇단에서의 입력과 출력을 살펴보면 종로봇으로의 출력은 속도이고, 종로봇으로부터의 입력은 힘으로, 이는 그림 5에서와 같은 Lawrence의 4채널 구조 원격조작시스템[1]에서 채널3과 채널4를 쓰지 않는 경우와 유사함을 알 수 있다. Lawrence가 4채널 구조를 제안하고 이상적인 경우에 대하여 투명성과 안정성을 만족하는 채널 제어기를 설계하는 방법을 제안한 이후[1]로, Salcudean은 [2,3]에서 local force feedback을 이용하면 안정성을 높이면서, 힘정보가 전달되는 채널(C_2, C_3)중에서 한 채널을 쓰지 않아도 됨을 보였다. 또한, 4채널중에서 2개씩의 채널을 선택하고 Llewellyn의 절대안정도 판별법과 전달 임피던스의 최소값과 범위를 이용하여 각각의 모드별로 안정성과 성능을 분석하였다. 하지만, 통신 채널에 시간 지연이 존재할 경우에 본 논문에서 안정화 기법으로 사용하고자 하는 웨이브 변수를 적

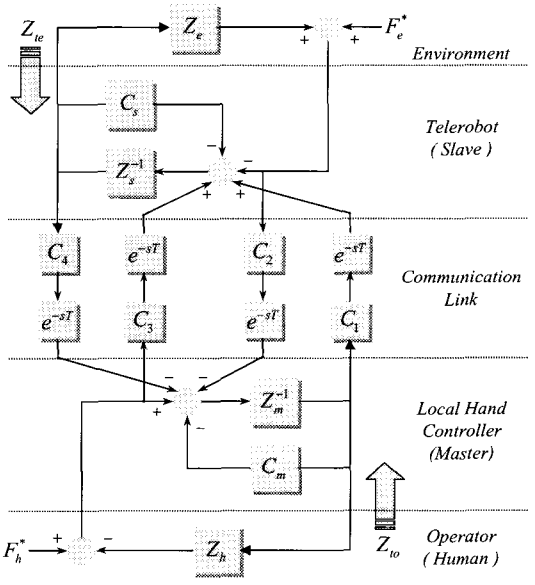


그림 5. Lawrence의 4채널 구조의 원격조작시스템.

Fig. 5. Block diagram of a general 4-channel teleoperation archtecture after Lawrence.

용한 원격조작시스템에 대한 성능을 평가한 연구는 지금까지 없었다. 그림 3과 그림 5를 비교해보면 4채널 원격조작시스템 구조에서 채널1과 채널2를 사용하는 속도-힘 구조와 웨이브 변수를 사용한 원격조작시스템의 구조가 유사함을 알 수 있다. 차이점으로는 4채널 구조에서는 주로봇단과 종로봇단 사이에 속도와 힘 정보가 독립적인 채널을 통하여 전송되므로 성능 분석이 용이하나, 웨이브 변수를 사용하는 구조는 채널간에 커플링이 존재하므로 상대적으로 해석이 어렵다. 따라서, 본 논문에서는 기존의 4채널 구조의 성능 분석에 사용된 2포트 네트워크의 해석방법을 웨이브 변수를 적용한 네트워크 시스템에 적용하여 특성 임피던스 b값의 변화가 시스템의 성능에 미치는 영향을 구체적으로 분석하고자 한다.

웨이브 변수를 적용한 시스템의 성능을 평가하기 위하여 그림 3의 구조에서 네트워크의 입력을 (V_h, F_e)로, 출력을 $(F_h, -V_e)$로 선택하면 2포트 네트워크의 하이브리드 파라미터는 (13)과 같이 정의될 수 있다.[10]

$$\begin{pmatrix} F_h \\ -V_e \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_h \\ F_e \end{pmatrix} \tag{13}$$

일반적으로 원격조작시스템의 성능은 투명성(transparency)로 나타내는데, 환경의 임피던스 Z_e 와 조작자에게 전달된 임피던스 Z_{to} 간의 관계를 의미하며, (14)와 같이 정의될 수 있다. 이상적인 경우에 완벽한 투명성은 조작자가 느끼는 임피던스 Z_{to} 가 환경의 임피던스 Z_e 와 같음을 의미한다.

$$Z_{to} = \left.\frac{F_h}{V_h}\right|_{F_h^*=0} = \frac{h_{11} + (h_{11}h_{22} - h_{12}h_{21})Z_e}{1 + h_{22}Z_e} \tag{14}$$

4채널 네트워크 구조에서 속도-힘 채널만 사용하는 경우의 하이브리드 파라미터 값들은 (15)와 같다.

$$\begin{aligned} h_{11:Lawrence} &= Z_{cm}, \quad h_{12:Lawrence} = C_2 e^{-2sT} \\ h_{21:Lawrence} &= -\frac{C_1 e^{-sT}}{Z_{cs}}, \quad h_{22:Lawrence} = \frac{1}{Z_{cs}} \end{aligned} \tag{15}$$

웨이브 변수를 사용한 네트워크 구조의 하이브리드 파라미터 값들을 부록A에서와 같이 구해보면 (16)과 같이 구해질 수 있다.

$$\begin{aligned} h_{11:Wave} &= Z_{cm} + \frac{(2\Gamma-1)\{bC_sZ_s(2\Gamma-1) - b^2Z_{cs}\}}{bZ_{cs} - C_sZ_s(2\Gamma-1)} \\ h_{12:Wave} &= \frac{2e^{-sT}}{1+e^{2sT}}\left(1 - \frac{bZ_s - C_sZ_s(2\Gamma-1)}{bZ_{cs} - C_sZ_s(2\Gamma-1)}\right) \\ h_{21:Wave} &= -\frac{2bC_s(1-\Gamma)e^{-sT}}{bZ_{cs} - C_sZ_s(2\Gamma-1)} \\ h_{22:Wave} &= \frac{b - C_s(2\Gamma-1)}{bZ_{cs} - C_sZ_s(2\Gamma-1)} \end{aligned} \tag{16}$$

여기서, $Z_{cm}=Z_m+C_m$, $Z_{cs}=Z_s+Z_c$, $\Gamma=e^{-2sT}(1+e^{-2sT})^{-1}$ 이다.

이제, 투명성을 정량적으로 기술하기 위하여 Z_e 가 0일 때 즉, 종로봇이 자유공간에서 환경과의 접촉이 없이 움직이는 경우에 전달 임피던스 Z_{to} 의 최소값은 (17)과 같이 구할 수 있다.

$$Z_{to\min} = Z_{to}|_{Z_e=0} = h_{11} \tag{17}$$

투명성이 좋다는 것은 $|Z_{to\min}| \to 0$ 을 의미한다. (15)와 (16)을 (17)에 대입하여 정리하면 각각 (18), (19)와 같다.

$$Z_{to\min:Lawrence} = Z_{cm} \tag{18}$$

$$Z_{to\min:Wave} = Z_{cm} + \frac{(2\Gamma-1)\{bC_sZ_s(2\Gamma-1) - b^2Z_{cs}\}}{bZ_{cs} - C_sZ_s(2\Gamma-1)} \tag{19}$$

(19)에 따르면 b값의 변화에 따라 4채널 구조와 웨이브 변수를 사용한 구조에서

$$\frac{(2\Gamma-1)\{bC_sZ_s(2\Gamma-1) - b^2Z_{cs}\}}{bZ_{cs} - C_sZ_s(2\Gamma-1)} \tag{20}$$

$Z_{to\min}$ 은 (20)만큼 차이가 나므로 b값이 커질수록 2.2절에서 언급한 바와 같이 안정성면에서는 좋아지지만, 성능면에서는 b값이 커지면 원격조작시스템이 매우 빠르게 움직이는 경우에 해당하는 10[rad/sec] 이상의 고주파 대역에서는 Z_{to} 의 최소값이 커지게 되므로 성능이 안좋아지게 될 것임을 예측할 수 있다.

그림 6과 그림 7은 각각 4채널 네트워크 구조에서 속도-힘 모드의 $Z_{to\min}$ 과 웨이브 변수를 적용한 네트워크 구조에서 b값의 변화에 따른 $Z_{to\min}$ 을 계산한 그래프다. 주어진 모의실험 환경에서 b의 값이 1일 경우에는 두 구조 모두 유사한 성능을 보이지만 b의 값이 100일 경우를 보면 특정 주파수 대역에서 Z_{to} 의 최소값이 약 50배정도 증가함을 알 수 있다.

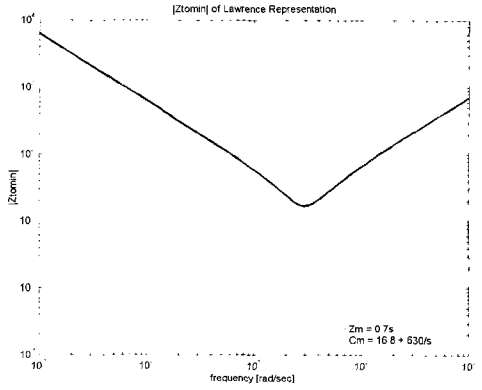


그림 6. 4채널 구조의 속도-힘 모드에서의 Z_{to}의 최소값.

Fig. 6. Z_{to} minimum plot at velocity-force mode of 4-channel architecture.

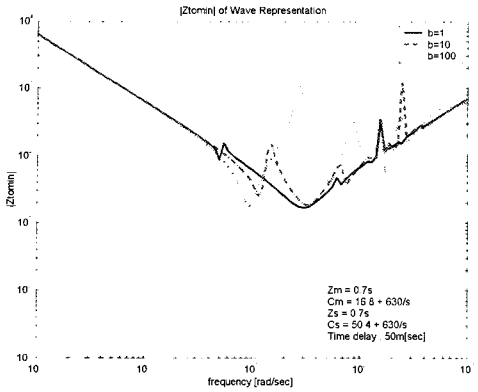
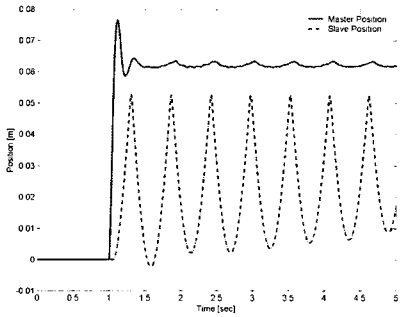
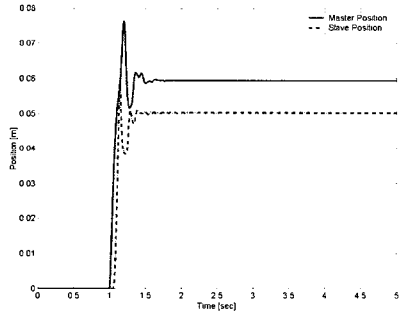


그림 7. 웨이브 변수를 사용한 경우의 b값의 변화에 따른 Z_{to}의 최소값.

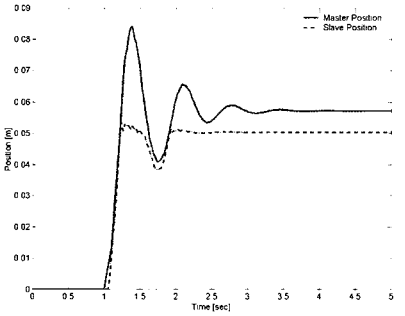
Fig. 7. Z_{to} minimum plot of wave-based architecture with different b.



(a) b=1



(b) b=25



(c) b=250

그림 8. b값의 변화에 따른 주로봇/종로봇의 위치응답.

Fig. 8. Position response of master/slave robot with different b.

그림 8은 b값의 변화에 따른 주로봇과 종로봇의 위치응답으로, b=1인 경우에는 종로봇이 안정화되지 못하고 진동함을 알 수 있고, b=250인 경우는 주로봇과 종로봇 모두 안정화가 되기는 하지만 수렴속도가 늦어지므로 성능이 안좋아 진다고 할 수 있다.

따라서, 안정성과 성능을 비교해보면 안정성을 위해서 b를 증가시키는 것이 좋지만 b의 값이 계속 커지면 성능이 나빠지므로 적절한 b의 값을 선택하는 것이 좋다.

III. 웨이브 기반 원격조작시스템의 제어 방법

본 절에서는 양방향 원격조작시스템의 제어를 위하여 수동성 제어기와 웨이브 변수를 함께 이용하는 혼합 방식을 제안한다. 부록B의 수동성 제어기[4, 5]는 주로봇단 또는 종로봇단의 수동성을 보장하는데 사용되며, 웨이브 변수는 주로봇단과 종로봇단이 안정할 경우에 통신 채널에 존재할 수 있는 시간 지연에 의해 불안정해진 시스템을 안정화하는 역할을 한다. 따라서, 양방향 원격조작시스템에서 주로봇/종로봇단의 불안정한 요소에 의해 수동성이 위배되면 수동성 제어기를 사용하여 수동성을 유지하도록 하며, 주로봇/종로봇단 사이의 통신 채널에 시간 지연이 존재하면 웨이브 변수를 사용하여 전체 시스템의 안정성을 보장하도록 한다.

다음 그림 9는 제안된 안정성 보장 방법에 대한 구조이다.

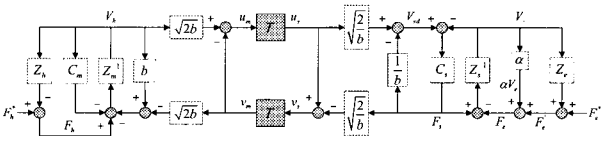


그림 9. 제안된 안정성 보장 방법.

Fig. 9. Proposed hybrid stabilization approach.

제안된 구조는 주로봇단, 통신 채널, 그리고 종로봇단으로 나누어진다. 주로봇단과 종로봇단을 연결하는 통신 채널에는 웨이브 변수를 적용하여 시간 지연이 존재할 때에도 전체 시스템을 안정화하고, 종로봇단의 환경에 수동성 제어기를 사용하여 환경에 불안정 요소가 있을 경우에 종로봇단을 안정하게 한다.

F_h^*과 F_e^*가 0일 때, 주로봇과 종로봇으로의 제어 입력은 (21), (22)와 같다.

주로봇 :

$$U_{master} = F_h - (b + C_m) V_h + \sqrt{2b}\, v_m \tag{21}$$

종로봇 :

$$U_{slave} = \frac{\sqrt{2b}C_s}{b + C_s} u_s - F_e' - \left(\alpha + \frac{bC_s}{b + C_s} \right) V_e \tag{22}$$

여기서, F_e'은 종로봇단의 환경에서 측정된 힘이고, 주로봇과 종로봇의 제어에는 PI제어기가 사용되었다.

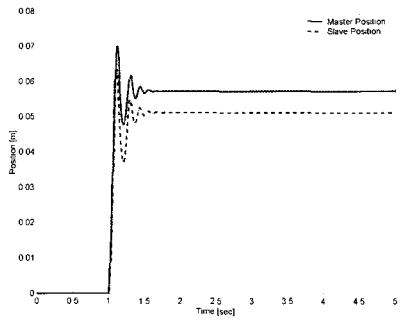
한편, (21)과 (22)에서 특성 임피던스 b는 2절에서 성능 및 안정성을 분석한 바와 같이 값이 커질수록 안정성 면에서는 좋아지지만 성능면에서는 안좋아지므로, (23)과 같이 종로봇단의 위치응답을 Short-time 푸리에 변환하여 단위 시간 동안의 주파수성분의 크기의 변화에 따라 b의 값을 가변하도록 하였다.

$$
\begin{aligned}
&x := Slave\ Position\ ;\\
&Y = STFFT(x)\ ;\\
&Mag_{stft} = Y \bullet conjugate(Y)\ ;\\
&Search\ Frequency\ having\ maximum\ \ Mag_{stft}\ ;\\
&Variation = (Current\ Mag_{stft} - Previous\ Mag_{stft}) / SamplingTime\ ;\\
&\delta = K \bullet Variation\ ;\\
&IF\ \ Variation > Variation_{Ref}\ \ THEN\ b_{new} = b_{old} + \delta\ ;\\
&Previous\ Mag_{stft} := Current\ Mag_{stft}\ ;
\end{aligned}
\tag{23}
$$

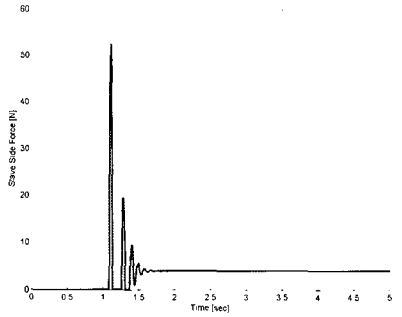
본 논문에서는 $K = 430$ 을 사용하였다.

IV. 모의실험

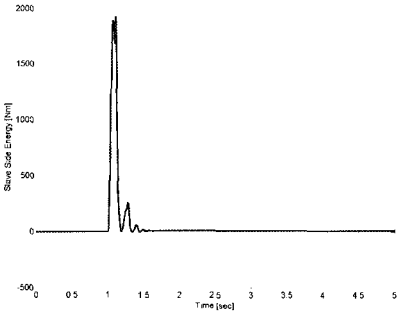
그림 1과 같이 구성된 양방향 원격조작시스템에서 주로봇단/종로봇단이 안정하고 통신 채널에 시간 지연이 없을 경우의 모의실험 결과는 그림 10과 같다. 모의실험에 사용된 파라미터값은 (24)과 같다.



(a) 주로봇/종로봇의 위치 응답



(b) 종로봇의 힘 응답



(c) 환경에서 관측된 에너지

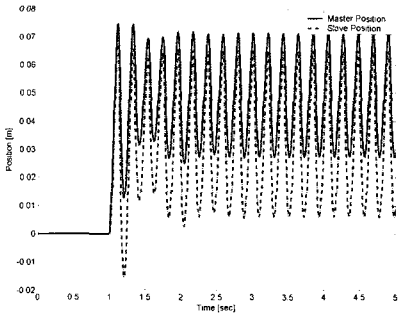
그림 10. 주로봇/종로봇의 위치/힘 응답과 환경에서 관측된 에너지.

Fig. 10. Position/Force response of master/slave robot and monitored energy at environment.

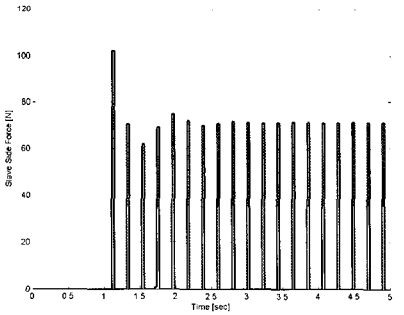
$$
\begin{aligned}
Z_m &= 0.7s,\ C_m = 16.8 + \frac{630}{s}\\
Z_s &= 0.7s,\ C_s = 50.4 + \frac{630}{s}
\end{aligned}
\tag{24}
$$

종로봇이 주로봇의 움직임을 안정적으로 추종하고, 종로봇단의 환경단에서 관측된 에너지는 수동성 조건을 만족하여 시스템이 안정함을 알 수 있다. 그림 10.(a)에서 정상상태에서 주로봇과 종로봇의 위치응답이 차이가 나는 이유는 종로봇이 자유공간에서 주로봇의 움직임을 추종하는 것이 아니고 환경과의 접촉이 있기 때문이다.

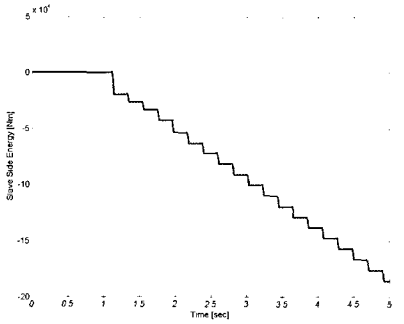
다음은 주로봇단 또는 종로봇단에 전체 시스템을 불안정하게 하는 요소가 있을 경우에 수동성 제어기의 효용성을 보이기 위하여 종로봇단의 환경에 30m[sec]의 시간지연이 존재한다고 가정한다. 환경에 시간지연이 존재하는 경우는 가상



(a) 주로봇/종로봇의 위치 응답



(b) 종로봇의 힘 응답



(c) 환경에서 관측된 에너지

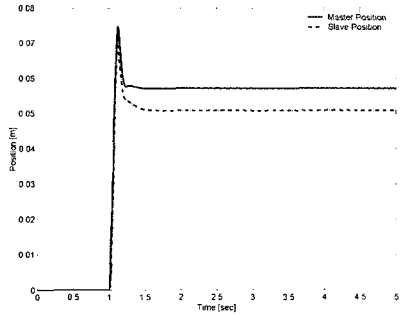
그림 11. 주로봇/종로봇의 위치/힘 응답과 환경에서 관측된 에너지(환경의 시간지연 : 30m[sec]).

Fig. 11. Position/Force response of master/slave robot and monitored energy at environment(30m[sec] delay in environment).

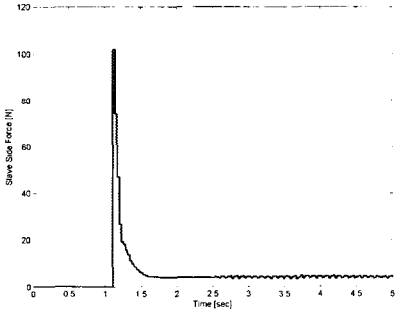
환경을 예로 들면, 표현하고자 하는 가상환경이 아주 복잡하여 계산시간이 많이 걸린다거나, 계산 능력이 떨어지는 컴퓨터를 제어기로 사용하는 경우 등이 될 수 있다. 이 때의 주로봇과 종로봇의 위치응답과 종로봇단에서의 관측된 에너지는 그림 11과 같다. 주로봇과 종로봇의 위치의 변화가 심하게 나타나고, 종로봇단에서 에너지를 생성하여 수동성에 위배됨을 볼 수 있다.

그림 11에서와 같이 환경에 존재하는 시간 지연으로 인하여 불안정해진 원격조작시스템에 수동성 제어기를 적용한 모의실험 결과는 그림 12와 같다. 종로봇단에 불안정한 요소가 존재하여도 수동성 제어기를 사용하면 전체 시스템의 수동성이 보장됨을 알 수 있다.

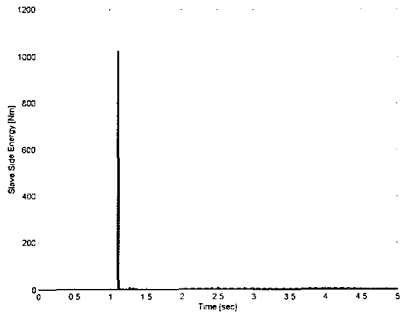
다음은 주로봇단과 종로봇단 사이의 통신 채널에 시간 지연이 존재하는 경우에 웨이브 변수를 사용하여 안정성이 보장되는지를 살펴본다. 주로봇단과 종로봇단 사이의 통신 채널



(a) 주로봇/종로봇의 위치 응답



(b) 종로봇의 힘 응답



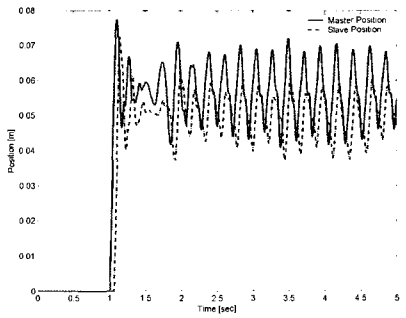
(c) 환경에서 관측된 에너지

그림 12. 수동성 제어기가 사용된 경우의 주로봇/종로봇의 위치/힘 응답과 환경에서 관측된 에너지.

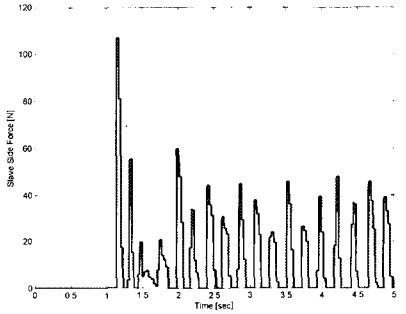
Fig. 12. Position/Force response of master/slave robot and monitored energy at environment where a Passivity Controller is applied.

에 시간 지연이 각각 50m[sec]씩 존재하고 종로봇단의 환경에 수동성 제어기가 사용된 경우의 위치응답은 그림13과 같다. 통신 채널에 시간 지연이 존재하면 그림에서와 같이 주로봇과 종로봇의 위치가 안정화되지 못하고 계속 진동함을 알 수 있다.

그림 14는 그림 13의 위치응답에 대한 속도응답을 Short-time 푸리에변환한 결과이다. 주파수성분의 크기가 모두 저주파영역(10Hz) 이하에 집중되어 있음을 알 수 있다. 그림 15는 (23)과 같은 과정으로 b의 값을 변경한 결과이다. 1.3초와 2초 정도에서 b값이 두차례 변경되었고 이로 인하여 종로봇의 위치 변화가 안정화됨을 알 수 있다.



(a) 주로봇/종로봇의 위치 응답



(b) 종로봇의 힘 응답

그림 13. 통신 채널에 시간 지연이 존재할 경우의 주로봇/종로봇의 위치/힘 응답.

Fig. 13. Position/Force response of master/slave robot when 50m[sec] communication delay exists.

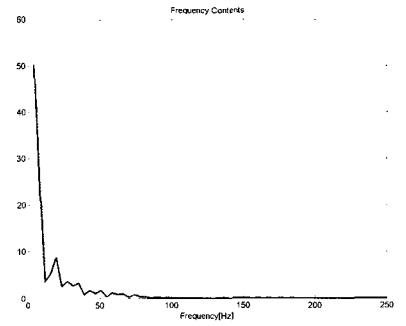
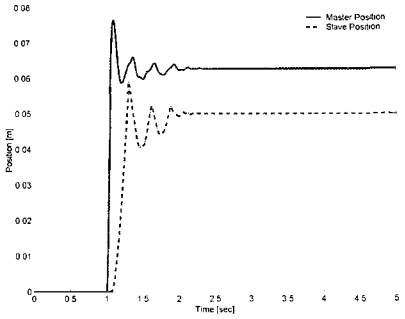
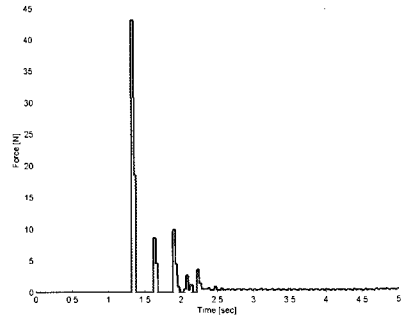


그림 14. 그림 13의 종로봇의 속도응답을 Short-time 푸리에 변환한 결과.

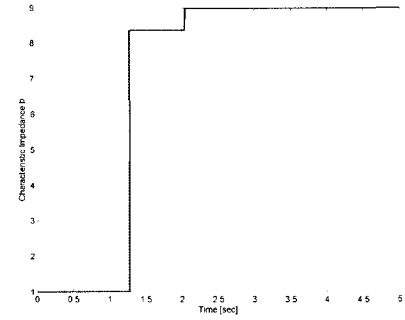
Fig. 14. Short-time FFT result of slave velocity in Fig.13.



(a) 주로봇/종로봇의 위치 응답



(b) 종로봇의 힘 응답



(c) b값의 변화

그림 15. 제안된 방법을 적용한 경우의 주로봇/종로봇의 위치/힘 응답 및 b값의 변화.

Fig. 15. Position/Force response of master/slave robot and variation of b when proposed method applied.

V. 결론

본 논문에서는 통신 채널에 시불변 시간 지연이 존재하는 양방향 원격조작시스템의 안정성을 수동성의 관점에서 보장하는 방법을 제안하였다. 주로봇단이나 종로봇단에 전체 원격조작시스템을 불안정하게 하는 요소가 있을 경우에는 수동성 제어기를 이용하여 수동성 조건을 만족하게 함으로서 시스템을 안정화하고, 통신 채널의 시간 지연으로 인하여 시스템이 불안정해질 경우에는 웨이브 변수를 사용하여 전체 시스템이 항상 안정할 수 있도록 하였다. 또한, 4채널 구조의 성능 해석 방법을 웨이브 변수를 적용한 네트워크 시스템에 도입하여 성능 및 안정성을 분석하였고, 특성 임피던스 b가 성능과 안정성에 미치는 영향을 정성적으로 분석하였다.

추후 연구로 양방향 원격조작시스템의 안정성은 수동성 관점에서 안정한지만을 검사할 뿐 얼마나 안정한지에 대한 안정성 마진은 알 수 없으므로 안정성의 마진을 구하고 이것이 성능에 미치는 영향을 분석하는 것과 통신 채널에 존재하는 시간 지연이 시간에 따라 변할 때에도 안정성을 보장하면서 성능을 높일 수 있는 방법에 대한 연구가 필요하다.

부록 A.

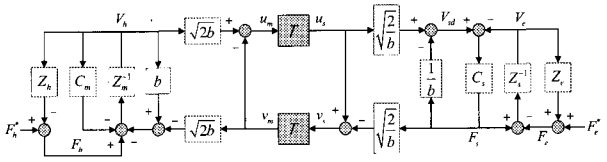


그림 16. 웨이브 변수 기반 원격조작시스템.

Fig. 16. Wave variable based teleoperation system.

그림 16에서 2단자 네트워크의 입력을 $(V_h, -F_e)$ 로, 출력을 $(F_h, -V_e)$로 선택하면 2단자 네트워크의 하이브리드 파라미터는 (A.1)과 같이 정의될 수 있다.[10]

$$\begin{pmatrix} F_h \\ -V_e \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_h \\ F_e \end{pmatrix} \rightarrow \begin{aligned} F_h &= h_{11}V_h + h_{12}F_e \\ -V_e &= h_{21}V_h + h_{22}F_e \end{aligned} \tag{A.1}$$

웨이브 변수간의 관계식을 구하면 (A.2), (A.3)과 같고, 하이브리드 파라미터를 구하기 위한 식들을 구하면 (A.4)~(A.7)과 같다.

$$u_m = \sqrt{2b}V_h - v_m \; ; \; u_s = u_m e^{-sT} = (\sqrt{2b}V_h - v_m)e^{-sT} \tag{A.2}$$

$$v_s = u_s - \sqrt{\frac{2}{b}}F_s \; ; \; v_m = v_s e^{-sT} = \left(u_s - \sqrt{\frac{2}{b}}F_s\right)e^{-sT} \tag{A.3}$$

$$v_m = \left(u_s - \sqrt{\frac{2}{b}}F_s\right)e^{-sT} = \sqrt{2b}V_h e^{-sT} - v_m e^{-2sT} - \sqrt{\frac{2}{b}}F_s e^{-sT} \tag{A.4}$$

$$\therefore v_m = \frac{1}{1+e^{-2sT}}\left(\sqrt{2b}e^{-2sT}V_h - \sqrt{\frac{2}{b}}e^{-sT}F_s\right)$$

$$u_m = \sqrt{2b}V_h - v_m = \left(\sqrt{2b} - \frac{\sqrt{2b}e^{-2sT}}{1+e^{-2sT}}\right)V_h + \frac{1}{1+e^{-2sT}}\sqrt{\frac{2}{b}}e^{-sT}F_s \tag{A.5}$$

$$\begin{aligned} V_{sd} &= \sqrt{\frac{2}{b}}u_s - \frac{F_s}{b} = \sqrt{\frac{2}{b}}\left(\sqrt{2b}V_h - v_m\right)e^{sT} - \frac{1}{b}\left(F_e + Z_s V_e\right) \\ &= 2(1-\Gamma)e^{-sT}V_h + \frac{1}{b}(2\Gamma - 1)F_e + \frac{Z_s}{b}(2\Gamma - 1)V_e \end{aligned} \tag{A.6}$$

여기서, $\Gamma = e^{-2sT}/\left(1+e^{-2sT}\right)$ 이다.

$$\begin{aligned} -V_e &= \frac{1}{Z_{cs}}\left(F_e - V_{sd}C_s\right) \\ &= \frac{F_e}{Z_{cs}} - \frac{C_s}{Z_{cs}}\left(2(1-\Gamma)e^{-sT}V_h + \frac{1}{b}(2\Gamma-1)F_e + \frac{Z_s}{b}(2\Gamma-1)V_e\right) \end{aligned} \tag{A.7}$$

(A.7)을 $-V_e$ 에 대하여 정리하면 (A.8)과 같다.

$$-V_e = -\frac{2bC_s(1-\Gamma)e^{-sT}}{bZ_{cs} - C_s Z_s(2\Gamma-1)}V_h + \frac{b - C_s(2\Gamma-1)}{bZ_{cs} - C_s Z_s(2\Gamma-1)}F_e \tag{A.8}$$

$$F_h=(Z_{cm}+b)V_h-\sqrt{2b}v_m=(Z_{cm}+b)V_h-\frac{2}{1+e^{-2sT}}(be^{-2sT}V_h-e^{-sT}F_s)$$
$$=(Z_{cm}+b-2b\Gamma)V_h+\frac{2e^{-sT}}{1+e^{-2sT}}F_e+\frac{2Z_se^{-sT}}{1+e^{-2sT}}V_e \quad (A.9)$$

(A.8)을 (A.9)에 대입하고 V_h와 F_e에 대하여 정리하면 (A.10)과 같다.

$$F_h=\left(Z_{cm}+\frac{(2\Gamma-1)\{bC_sZ_s(2\Gamma-1)-b^2Z_{cs}\}}{bZ_{cs}-C_sZ_s(2\Gamma-1)}\right)V_h+$$
$$\frac{2e^{-sT}}{1+e^{-2sT}}\left(1-\frac{bZ_s-C_sZ_s(2\Gamma-1)}{bZ_{cs}-C_sZ_s(2\Gamma-1)}\right)F_e \quad (A.10)$$

(A.8), (A.10)을 (A.1)과 비교해보면 하이브리드 파라미터는 (A.11)과 같다.

$$h_{11}=Z_{cm}+\frac{(2\Gamma-1)\{bC_sZ_s(2\Gamma-1)-b^2Z_{cs}\}}{bZ_{cs}-C_sZ_s(2\Gamma-1)}$$
$$h_{12}=\frac{2e^{-sT}}{1+e^{-2sT}}\left(1-\frac{bZ_s-C_sZ_s(2\Gamma-1)}{bZ_{cs}-C_sZ_s(2\Gamma-1)}\right) \quad (A.11)$$
$$h_{21}=-\frac{2bC_s(1-\Gamma)e^{-sT}}{bZ_{cs}-C_sZ_s(2\Gamma-1)}$$
$$h_{22}=\frac{b-C_s(2\Gamma-1)}{bZ_{cs}-C_sZ_s(2\Gamma-1)}$$

부록 B.

일반적으로 네트워크 시스템의 안정성은 수동성(passivity)로 판별할 수 있는데, 임의의 시스템이 수동적이라는 것은 시스템이 내부적으로 에너지를 소모한다는 것이며 이는 시스템이 안정함을 의미한다.

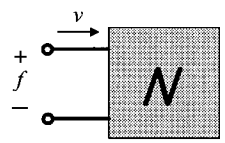


그림 17. 1단자 네트워크.
Fig. 17. 1-port network.

그림 17과 같은 1단자 네트워크에서 속도를 flow로, 힘을 effort로 가정하면 시스템 N에 전달되는 총에너지는 힘과 속도 곱의 시간적분으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E(t)=\int_0^t v(\tau)i(\tau)d\tau+E(0) \quad (B.1)$$

여기서, $E(0)$는 초기에 네트워크에 저장되어 있는 에너지의 양이다. 시스템에 입력되는 에너지의 양이 0이상이면 이 시스템의 입력 에너지가 출력 에너지보다 크다는 것을 의미한다. 즉, 시스템에서 에너지를 생성하지 않고 소비하므로 수동적인 시스템이 되어 결과적으로 시스템은 안정하게 된다.
수동성 관측기는 시스템에서 이동하는 에너지를 실시간으로 모니터링하여 수동성 조건을 만족하는지의 여부를 검사한다 [4, 5]. 컴퓨터를 이용하여 제어기를 구성하면 이산 신호 시스템이 되므로, (B.1)을 이산신호로 변형하면 (B.2)와 같다.

$$E_{obsv}(n)=\Delta T\sum_{k=0}^{n}f(k)v(k)+E(0) \quad (B.2)$$

여기서, ΔT는 샘플링 주기를 나타내고 $E(0)$는 초기에 시스템에 저장된 에너지의 양이다. 모든 n에 대하여 $E_{obsv}(n)\geq 0$이면 이 시스템은 에너지를 소비하며 시스템은 안정한 상태가 되고, $E_{obsv}(n)<0$이면 이 시스템은 에너지를 생성하므로 시스템이 불안정해지게 된다.
시스템이 임의의 순간에 에너지를 생성하여 불안정해질 경우에 그 시스템에서 생성된 에너지의 양을 알 수 있다면 이 시스템이 수동적이 되기 위하여 소비해야 하는 에너지의 양을 시간에 따라 계산할 수 있는데 이것을 수동성 제어기라고 한다[4, 5]. 수동성 제어기의 형태로는 소모성 소자(dissipative element)를 직렬형 또는 병렬형으로 연결이 가능하며, 본 논문에서는 직렬형 구조를 사용한다. 직렬형 구조의 제어기는 (B.3)과 같고, (B.4)와 같은 반복과정을 통하여 실시간으로 를 구할 수 있다.

$$f_1=f_2+\alpha v_1 \quad (B.3)$$

1) $v_1(n)=v_2(n)$: 입력
2) $f_2(n)=F_N(v_2(n))$: 1포트 네트워크의 출력
3) $E_{obsv}(n)=E_{obsv}(n-1)+\{f_2(n)v_2(n)+\alpha(n-1)v_2(n-1)^2\}\Delta T$ (B.4)
4) $\alpha(n)=\begin{cases}-E_{obsv}(n)/\Delta Tv_2(n)^2, & E_{obsv}(n)<0\\ 0, & E_{obsv}(n)\geq 0\end{cases}$
5) $f_1(n)=f_2(n)+\alpha(n)v_2(n)$: 수정된 출력

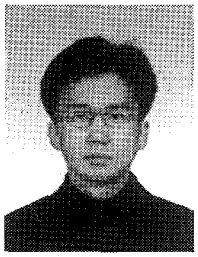
참고문헌

[1] D. A. Lawrence, "Stability and transparency in bilateral teleoperation," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 9, no. 5, p. 624-637, 1993.
[2] K. Hashtrudi-Zaad and S. E. Salcudean, "Analysis and evaluation of stability and performance robustness for teleoperation control architectures," *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, p. 3107-3113, 2000.
[3] K. Hashtrudi-Zaad and S. E. Salcudean, "Transparency in time-delayed systems and the effect of local force feedback for transparent teleoperation," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 18, no. 1, p. 108-114, 2002.
[4] B. Hannaford and J. H. Ryu, "Time-domain passivity control of haptic interfaces," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 18, no. 1, p. 1-10, 2002.
[5] J. H. Ryu, D. S. Kwon and B. Hannaford, "Stable teleoperation with time domain passivity control," *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, vol. 3, p. 3260-3265. 2002.
[6] G. Niemeyer and J. E. Slotine, "Stable adaptive teleoperation," *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 16. no. 1, p. 152-162, 1991.

[7] G. Niemeyer and J. E. Slotine, "Using Wave Variables for System Analysis and Robot Control," *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, p. 1619-1625, 1997.
[8] G. Niemeyer and J. E. Slotine, "Designing Force Reflecting Teleoperators with Large Time Delays to Appear as Virtual Tools", *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, p. 2212-2218, 1997.
[9] J. E. Colgate and J. M. Brown, "Factors Affecting the Z-width of a Haptic Display," *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 3205-3210, 1994.
[10] S. S. Haykin, "Active Network Theory," *Addison-Wesley*, 1970.

김 형 욱

제어·자동화·시스템공학 논문지 제 8 권 제 12 호 참조.



김 종 복

1977년 8월 27일생. 2001년 조선대학교 제어계측공학과(공학사). 2003년 한양대학교 대학원 전자전기제어계측공학과(공학석사). 2003년~현재 한양대학교 정보통신대학원 박사과정. 관심분야 : 원격제어, 햅틱시스템.

서 일 홍

제어·자동화·시스템공학 논문지 제 6 권 제 4 호 참조.

이 병 주

제어·자동화·시스템공학 논문지 제 6 권 제 7 호 참조.