

양방향 원격조작에서의 안정성과 성능에 관한 비교연구

Comparative Study on the Stability and the Performance in Bilateral Teleoperation

김진욱*, 김형욱*, 이병주*, 서일홍*

*한양대학교전자컴퓨터공학부 (Tel:81-31-408-5802; Fax:81-31-408-5802; E-mail:ihsuh@hanyang.ac.kr)

Abstract : Teleoperation is a rapidly progressing field promising to have significant application in space, mining, medical, and other areas. Unfortunately, significant communication delays are expected in teleoperation. With this problem, the two major issues in teleoperation are stability robustness and transparency performance. Recent work in bilateral teleoperation in the two-channel showed that for any two-channel control architecture, stability robustness is enhanced if the feedforward control parameters are lowered. In this paper, we analyze the stability and performance robustness of the three channels control architectures using the passivity-based Llewellyn's absolute stability criterion as well as the minimum values and Z-width's of the operator and environment transmitted impedances. And the stability and the performance robustness of two and three channels control architectures are quantitatively compared.

Keyword : teleoperation, time delay, Llewellyn's absolute stability , minimum values , Z-width , three channel

1. 서론

최근들어 인간이 작업하기 위험한 원자로, 심해저, 우주공간 등에서 인간을 대신하여 로봇에게 작업을 지시하는 원격제어에 대한 많은 연구가 이루어지고 있다. 조작자(human operator)는 주로봇(master robot)을 이용하여 종로봇(slave robot)을 원격조정(teleoperation)한다. 이때 주로봇과 종로봇은 각각 통신채널을 통해서 속도와 힘에 대한 정보를 서로 주고 받기 때문에 4채널이 기본적으로 필요하게 된다[1,3,4]. 가장 이상적인 시스템의 성능은 원격지에서 작업하는 종로봇의 힘 정보를 주로봇으로부터 동일하게 조작자가 받는 것이다. 이를 위한 필요충분조건이 3, 4채널 각각에 대해서 증명되었다[1,3,4]. 한편, 통신채널에 시간지연이 존재하면 시스템의 성능과 안정성에 안 좋은 영향을 주게 되므로, 이러한 시간지연에 의한 문제를 해결하기 위한 방법이 여러 가지 제시되고 있다. 최근의 연구에서는 4채널이 아닌 2채널만으로도 높은 안정성을 보장할 수 있다는 것을 Llewellyn의 절대 안정도 판별법으로 보였고, 주로봇과 종로봇 양쪽 각각에 전송되어지는 임피던스의 최소값(minimum value)과 Z-width를 통해서 2채널의 성능이 우수하다는 것을 보였다[2].

본 논문에서는 Llewellyn의 절대 안정도 판별법과 주로봇과 종로봇 양쪽 각각에 전송되어지는 임피던스의 최소값(minimum value)과 Z-width를 통해서, 3채널의 안정성과 성능을 분석/평가한다. 본 논문의 구성은 2장 1절에서 일반적인 2포트 네트워크에 대해서 설명하고, 2절에서는 안정도와 성능 평가를 위한 판별법을 간략하게 소개하며, 3절에서는 일반적인 4채널 구조의 양방향 원격제어 구조를 설명한다. 3장에서는 3채널의 각 모드에 대해서 안정도와 성능을 분석하며, 마지막으로 3채널과 2채널과의 비교를 통해 성능 및 안정성에 어떤 차이가 있는지를 살펴본다.

2. 안정성 판별법과 성능지수

2.1. 2포트 네트워크 모델

원격제어 시스템의 구조를 살펴보면, 주로봇과 종로봇, 그리고 그 사이에 통신 채널로 구성되어 있다(그림1). 조작자와 환경(environment)은 라플라스 영역(Laplace domain)에서 LTI system으로 모델링이 된다.[1,2,3]

$$F_h = F_h^* - Z_h V_h, \quad F_e = F_e^* + Z_e V_e \tag{1}$$

여기서, Z_h, Z_e, V_h, V_e 는 각각 주로봇과 종로봇의 임피던스와 속도를 의미한다. F_h, F_e, F_h^*, F_e^* 는 각각 조작자가 주로봇에 가하는 힘, 종로봇이 작업대상에 가하는 힘, 그리고 주로봇과 종로봇에 인가되는 외력이다.

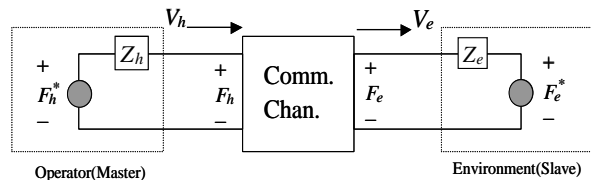


그림 1. 원격제어 네트워크 블록 다이어그램
Figure 1. A teleoperation network block diagram

위의 모델을 주파수영역에서 라플라스 변환하면, 2 포트 네트워크 구조에 대한 임피던스(impedance, Z), 어드미턴스(admittance, Y), 하이브리드(hybrid, H), 역 하이브리드(inverse hybrid, G) 행렬을 구할 수 있다. 이 4가지 표현방법을 통칭하여 이미턴스(immittance, P)라 한다 [5].

$$\begin{bmatrix} F_h \\ F_e \end{bmatrix} = Z \begin{bmatrix} V_h \\ -V_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} \\ z_{21} & z_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_h \\ -V_e \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} V_h \\ -V_e \end{bmatrix} = Y \begin{bmatrix} F_h \\ F_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} \\ y_{21} & y_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_h \\ F_e \end{bmatrix} \tag{2}$$

$$\begin{bmatrix} F_h \\ -V_e \end{bmatrix} = H \begin{bmatrix} V_h \\ F_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_h \\ F_e \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} V_h \\ F_e \end{bmatrix} = G \begin{bmatrix} F_h \\ -V_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} \\ g_{21} & g_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_h \\ -V_e \end{bmatrix}$$

2.2. Llewellyn의 절대 안정도 판별법

- (1) 이미턴스 파라미터 p_{11}, p_{22} 은 RHP(right-half-plane)에 극점이 없어야 한다.
- (2) 허수축 위의 어떠한 p_{11}, p_{22} 의 극점도 양의 실수 residue를 가져야 한다.
- (3) 다음의 부등식이 성립해야 한다.

$$\Re\{p_{11}\} \geq 0 \tag{3}$$

$$\eta_p(\omega) = -\frac{\Re\{p_{12}p_{21}\}}{|p_{12}p_{21}|} + 2\frac{\Re\{p_{11}\}\Re\{p_{22}\}}{|p_{12}p_{21}|} \geq 1 \tag{4}$$

여기서, $\eta_p(\omega)$ 는 안정도 파라미터이다. 이 조건은 어떠한 이미턴스에도 모두 성립한다. 즉, $\eta_y = \eta_z = \eta_H = \eta_g$ 이 성립한다[5].

2.3. 성능평가

조작자는 주로봇장치를 통하여 종로봇에서 일어나는 모든 상황에 대한 운동감각을 전달 받을 수 있어야 한다. 즉, 조작자에게 전달되는 작업영역에서의 임피던스는 종로봇이 느끼는 작업환경의 임피던스와 같아야 한다. 이를 투명성(transparency)으로 정의할 수 있는데, 종로봇에서 주로봇으로 전달된 임피던스와 주로봇에서 종로봇으로 전달된 임피던스를 판별 하므로써 그 성능을 판별할 수 있다. 말하자면,

$$Z_{to} := \left. \frac{F_h}{V_h} \right|_{F_h^*=0} = \left. \frac{F_e}{V_e} \right|_{F_e^*=0} := Z_e, \quad Z_{te} := \left. \frac{F_e}{V_e} \right|_{F_e^*=0} = \left. \frac{F_h}{V_h} \right|_{F_h^*=0} := Z_h$$

가 성립되어야 한다. 자유공간에서 작업 시에는 그 값이 0이어야 하고, 강한 충돌의 경우 그 값은 무한대로 커져야 한다. 성능평가를 위한 지수로, 주로봇, 종로봇 각각에 전송된 임피던스의 최소값과 구현가능한 임피던스의 범위(Z-width)를 다음과 같이 정의할 때,

$$Z_{to\min} := Z_{te} |_{z_e=0} = h_{11}, \quad Z_{te\min} := Z_{te} |_{z_s=0} = \frac{h_{11}}{\Delta h}$$

$$Z_{to\width} := Z_{to} |_{z_e=\infty} - Z_{to\min} = \frac{-h_{22}h_{21}}{h_{22}} \tag{5}$$

$$Z_{te\width} := Z_{te} |_{z_s=\infty} - Z_{te\min} = \frac{-h_{22}h_{21}}{h_{22}\Delta h}$$

성능은 $|Z_{to\min}| \rightarrow 0, |Z_{te\min}| \rightarrow 0, 1/|Z_{to\width}| \rightarrow 0, 1/|Z_{te\width}| \rightarrow 0$

일수록 우수한 성능을 나타낸다. 여기서 $\Delta h = h_{11}h_{22} - h_{21}h_{21}$ 이다[6].

2.4. 4채널 양방향 원격제어 구조

그림2는 일반적인 4채널 양방향 원격제어 구조의 블록 다이어그램이다. 여기서 Z_m, Z_s 는 각각 주로봇, 종로봇의 임피던스로서 동역학 특성을 나타낸다. C_1, C_4 는 각각 주로봇에서 종로봇 쪽으로, 종로봇에서 주로봇쪽으로의 속도전달채널이 되고, C_2, C_3 는 종로봇에서 주로봇쪽으로, 주로봇에서 종로봇쪽으로 들어 가는 힘전달채널이 된다. 이때 C_2, C_3 는 스칼라(scalar)값을 가지게 된다. C_5, C_6 은 각각 종로봇과 주로봇에 있는 local force feed back이다. 하이브리드 파라미터를 구하면

$$h_{11} = \frac{Z_{cm}Z_{cs} + C_1C_4e^{-2sT_d}}{(1+C_6)Z_{cs} - C_3C_4e^{-2sT_d}}$$

$$h_{12} = \frac{C_2Z_{cs}e^{-sT_d} - (1+C_5)C_4e^{-sT_d}}{(1+C_6)Z_{cs} - C_3C_4e^{-2sT_d}}$$

$$h_{21} = -\frac{C_3Z_{cm}e^{-2sT_d} + (1+C_6)C_1e^{-sT_d}}{(1+C_6)Z_{cs} - C_3C_4e^{-2sT_d}}$$

$$h_{22} = \frac{(1+C_5)(1+C_6) - C_2C_3e^{-2sT_d}}{(1+C_6)Z_{cs} - C_3C_4e^{-2sT_d}} \tag{6}$$

이 되고, 시간지연이 없는 경우에 완벽한 투명성을 보장할 때의 각 채널 파라미터를 구하면,

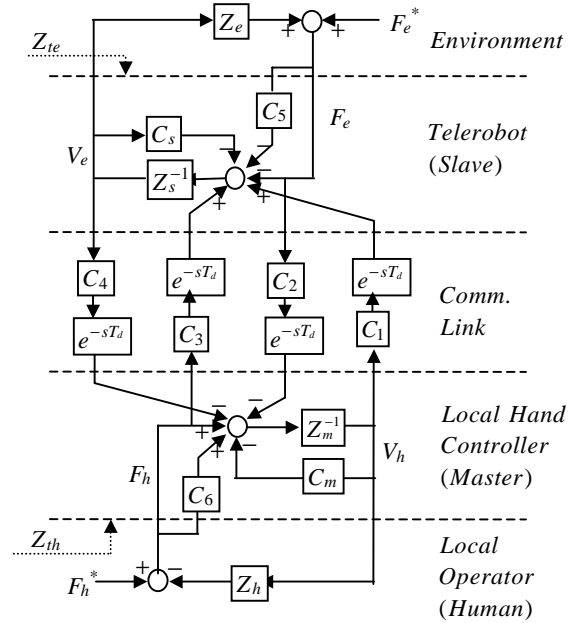


그림 2. 일반적인 4채널 양방향 원격제어구조
Figure 2. General 4-channel Bilateral control architecture

$$\begin{cases} C_1 = Z_{cs}, & C_2 = 1 + C_6 \\ C_3 = 1 + C_5, & C_4 = -Z_{cm} \end{cases} \tag{7}$$

이다. 여기서, $Z_{cs} = Z_s + C_s, Z_{cm} = Z_m + C_m$ 이다[1].

3. 3채널 제어 구조 안정성 분석 및 성능평가

여기서는 4개의 통신채널 중에서 각 채널이 하나씩 없는 경우에 대하여, 각 모드에 대한 시스템의 안정도와 성능을 분석하게 된다. 2채널과 달리, 3채널은 복잡한 다항식의 형태로 나타남을 알 수 있다.

3.1. 모드 I ($C_2 = 0$)

이 모드는 종로봇에서 주로봇으로 가는 force feedforward가 없는 경우이다. 이 경우, 역 하이브리드 파라미터를 구하는 것이 시스템을 분석하는데 편하다. 식(6)을 이용하면,

$$g_{11} = \frac{h_{22}}{\Delta h} = \frac{(1+C_6)}{Z_{cm}}, \quad g_{12} = -\frac{h_{12}}{\Delta h} = \frac{C_4e^{-sT_d}}{Z_{cm}}$$

$$g_{21} = -\frac{h_{21}}{\Delta h} = \frac{C_3Z_{cm}e^{-sT_d} + (1+C_6)C_1e^{-sT_d}}{(1+C_5)Z_{cm}} \tag{8}$$

$$g_{22} = \frac{h_{11}}{\Delta h} = \frac{Z_{cm}Z_{cs} + C_1C_4e^{-2sT_d}}{(1+C_5)Z_{cm}}$$

된다. 안정도 판별을 위해, 수식(4)를 이용하면,

$$\eta_{C2}(\omega) = \eta_{C21} + \eta_{C22}$$

$$= \text{sgn}(1+C_5) \left[-\cos \left(\angle \left\{ \frac{C_4e^{-j2\omega T_d} \{C_3Z_{cm} + (1+C_6)C_1\}}{Z_{cm}^2} \right\} \right) \right] \tag{9}$$

$$+ 2\text{sgn}(1+C_5) \left[\frac{(1+C_6)\cos \left(\angle \frac{1}{Z_{cm}} \right) \Re \left\{ \frac{Z_{cm}Z_{cs} + C_1C_4e^{-j2\omega T_d}}{Z_{cm}} \right\}}{\left| \frac{C_4 \{C_3Z_{cm} + (1+C_6)C_1\}}{Z_{cm}} \right|} \right]$$

이 된다. 식(9)는 Local slave force feedback과는 상관없는 수식인 된다는 것을 알 수 있다. $\eta_{C21} \in [-1, 1]$ 이 되므로, $\eta_{C22} \geq 2$ 이어야 한다. 여기서, $\cos \left(\angle \frac{1}{Z_{cm}} \right) \in [0, 1]$ 이 된다. 따라서, $(1+C_6)$

$\Re\{Z_{cs} + C_1C_4Z_{cm}^{-1}e^{-2sT_d}\} > \text{sgn}(1+C_5)\left|C_4\left\{C_3 + (1+C_6)C_1Z_{cm}^{-1}\right\}\right|$ 이어야 한다. 위 식에서 알 수 있듯이 slave damping을 높이는 것은 전체적으로 시스템의 stability를 높이는 방법이 된다. 또한 local master force feedback C_6 를 높이는 것이 시스템을 안정하게 한다. 반대로 coordinating force feedforward C_4 를 감소시키는 것이 시스템의 안정성을 높인다는 것을 알 수 있다. $\Re\{g_{11}\} = \Re\left\{\frac{(1+C_6)}{Z_{cm}}\right\} \geq 0$

을 만족하여, Llewellyn의 절대 안정도 조건을 만족한다. 시스템의 성능을 살펴보기 위해, 식(5)를 이용 하면,

$$\begin{aligned} Z_{tomin} &= \frac{Z_{cm}Z_{cs} + C_1C_4e^{-2sT_d}}{(1+C_6)Z_{cs} - C_3C_4e^{-2sT_d}}, \\ Z_{temin} &= \frac{Z_{cm}Z_{cs} + C_1C_4e^{-2sT_d}}{(1+C_5)Z_{cm}}, \\ Z_{tewidth} &= -\frac{C_4e^{-2sT_d}\{C_3Z_{cm} + (1+C_6)C_1\}}{(1+C_6)\{(1+C_6)Z_{cs} - C_3C_4e^{-2sT_d}\}}, \\ Z_{tewidth} &= -\frac{C_4e^{-2sT_d}\{C_3Z_{cm} + (1+C_6)C_1\}}{(1+C_6)(1+C_5)Z_{cm}} \end{aligned} \quad (10)$$

이 된다. 이 경우 local master force feedback C_6 을 감소시키는 것이 Z-width를 증가 시킨다는 것과 반대로 coordinating force feedforward C_4 를 증가시키는 것이 dynamic range를 증가시킨다는 것을 알 수 있다. 또한 local slave force feedback C_5 을 증가 시키는 것이 Z_{temin} 을 감소시킨다는 것을 알 수 있다. Transparency-optimized law을 적용하면

$$\begin{aligned} \eta_{C2} &= \cos\left(\angle\left\{\left((1+C_5) + (1+C_6)\frac{Z_{cs}}{Z_{cm}}\right)e^{-2sT_d}\right\}\right) \\ &+ 2\frac{(1+C_6)\cos\left(\angle\frac{1}{Z_{cm}}\right)\Re\{Z_{cs}(1-e^{-2sT_d})\}}{|(1+C_5)Z_{cm} + (1+C_6)Z_{cs}|} \end{aligned} \quad (11)$$

이 된다. 식(11)에 의하면, local slave force feedback을 낮게 할수록, stability는 급격히 나아진다. local slave force feedback C_5 가 -1에 가까워 질 때, 그 결과는 2채널의 Velocity-Velocity 제어구조와 같은 특성을 가지게 된다. 또한 local master force feedback을 높이는 것이 안정성을 높인다는 것을 알 수 있다. 시간지연이 없는 경우 안정성을 하이브리드 파라미터를 이용하면,

$\cos\left(\angle\left(\frac{Z_{cm}}{(1+C_6)Z_{cs} + (1+C_5)Z_{cm}}\right)\right)$ 된다. 식에서 보듯이 local master force feedback $C_6 = -1$ 인 경우, $\eta_{C2} = 1, \forall \omega$ 이 성립하게 된다는 것을 알 수 있다.

3.2. 모드 II ($C_3 = 0$)

이 모드는 주로부터 종로봇쪽으로 가는 force feedforward control이 없는 경우이다. 이 경우, 하이브리드 파라미터를 구하는 것이 시스템을 분석하는데 편하다. 식(6)를 이용하면,

$$\begin{aligned} h_{11} &= \frac{Z_{cm}Z_{cs} + C_1C_4e^{-2sT_d}}{(1+C_6)Z_{cs}}, \quad h_{12} = \frac{C_2Z_{cs}e^{-sT_d} - (1+C_5)C_4e^{-sT_d}}{(1+C_6)Z_{cs}}, \\ h_{21} &= -\frac{C_1e^{-sT_d}}{Z_{cs}}, \quad h_{22} = \frac{(1+C_5)}{Z_{cs}} \end{aligned} \quad (12)$$

안정도 판별을 위해, 식(4)를 이용하면,

$$\begin{aligned} \eta_{C3} &= \eta_{C31} + \eta_{C32} \\ &= \text{sgn}(1+C_6)\cos\left(\angle\left\{\frac{C_1e^{-sT_d}}{Z_{cs}}\left(\frac{C_2Z_{cs}e^{-sT_d} - (1+C_5)C_4e^{-sT_d}}{Z_{cs}}\right)\right\}\right) \\ &+ 2\text{sgn}(1+C_6)\left[\frac{\Re\left(\frac{Z_{cm}Z_{cs} + C_1C_4e^{-2sT_d}}{Z_{cs}}\right)\cos\left(\angle\frac{1}{Z_{cs}}\right)}{\left|\frac{C_1\{C_2Z_{cs} - C_4(1+C_5)\}}{Z_{cs}}\right|}\right] \end{aligned} \quad (13)$$

이 된다. 식에서 보듯이 local master force feedback은 아무런 영향을 끼치지 못 한다는 것을 알 수 있다. $\eta_{C31} \in [-1, 1]$ 이 되므로, $\eta_{C32} \geq 2$ 일 때만, 시스템이 안정해진다. η_{C32} 에서 $\cos(\angle Z_{cs}^{-1}) \in [0, 1]$ 이므로, $\Re\{Z_{cm} + C_1C_4Z_{cs}^{-1}e^{-2sT_d}\} > |C_1\{C_2 - C_4Z_{cs}^{-1}(1+C_5)\}|$ 이 되어야 한다. 즉, master damping을 올리는 것이 시스템의 안정성을 높이는 방법이 된다. 또한 coordinating force feedforward C_1 을 감소시키는 것이 시스템의 안정성을 높인다는 것을 알 수 있다. 시스템의 성능을 살펴보기 위해, 식(5)를 이용하면,

$$\begin{aligned} Z_{tomin} &= \frac{Z_{cm}Z_{cs} + C_1C_4e^{-2sT_d}}{(1+C_6)Z_{cs}}, \\ Z_{temin} &= \frac{Z_{cm}Z_{cs} + C_1C_4e^{-2sT_d}}{Z_{cs}\{(1+C_5)Z_{cm} + C_1C_2e^{-2sT_d}\}}, \\ Z_{tewidth} &= \frac{C_1e^{-2sT_d}\{C_2Z_{cs} - (1+C_5)C_4\}}{Z_{cs}(1+C_5)(1+C_6)}, \\ Z_{tewidth} &= \frac{C_1e^{-2sT_d}\{C_2Z_{cs} - (1+C_5)C_4\}}{Z_{cs}(1+C_5)\{(1+C_5)Z_{cm} + C_1C_2e^{-2sT_d}\}} \end{aligned} \quad (14)$$

이 된다. 식(14)를 통해, local slave position feedback을 높일 경우, minimum value는 감소시키나, Z-width를 감소시켜 전체 성능에 복합된 영향을 끼친다. local master force feedback C_6 을 높이는 것이 Z_{tomin} 을 감소 시킨다는 것을 알 수 있다. 반대로 이것은 $Z_{tewidth}$ 를 감소 시키는 역할을 하게 되어 dynamic range를 줄인다. Local slave force feedback C_5 역시 Z-width를 결정하는 주요 변수가 되는 것을 알 수 있다. Coordinating force feedforward C_1 은 Z-width를 증가시킨다는 것을 알 수 있다. Transparency optimized law을 적용 하면,

$$\begin{aligned} \eta_{C3} &= \cos\left(\angle\left\{\left((1+C_6) + (1+C_5)\frac{Z_{cm}}{Z_{cs}}\right)e^{-2sT_d}\right\}\right) \\ &+ 2\frac{(1+C_5)\Re\{Z_{cm}(1-e^{-2sT_d})\}\cos\left(\angle\frac{1}{Z_{cs}}\right)}{|(1+C_6)Z_{cs} + (1+C_5)Z_{cm}|} \end{aligned} \quad (15)$$

이 된다. 식(15)에 의하면, local master force feedback을 감소시킬수록, 안정성은 나아진다. local master force feedback C_6 가 -1에 가까워 질 때, 그 결과는 2채널의 Velocity-Velocity 제어구조와 같은 특성을 가지게 된다.

시간지연이 없는 경우, $\cos\left(\angle\left\{(1+C_6) + (1+C_5)\frac{Z_{cm}}{Z_{cs}}\right\}\right)$ 이 된다

$C_5 = -1$ 인 경우, $\eta_{C3} = 1, \forall \omega$ 인 것을 알 수 있다.

4. 2채널과 3채널의 비교

기존 2채널에 관한 분석/평가에서, 안정성이나 성능에 관한 수식자체가 간단하므로, 시스템 분석이 쉽게 이루어 질 수 있었다[2]. $C_1 \sim C_4$ (feedforward signal)을 줄여서, 안정성을 높일 수 있었으나, 반대로 성능이 안 좋아지게 되었다. 즉, 안정성과

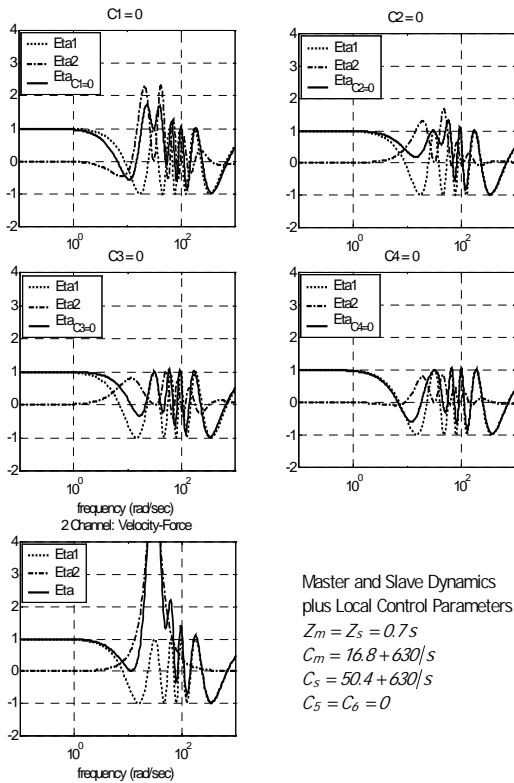


그림 3. 최적화된 투명성 조건에서의 안정성 분석
시간지연 Td=100msec
Figure 3. Stability analysis for transparency-optimized architecture with Td =100(msec)

Master and Slave Dynamics
plus Local Control Parameters
 $Z_m = Z_s = 0.7s$
 $C_m = 16.8 + 630/s$
 $C_s = 50.4 + 630/s$
 $C_5 = C_6 = 0$

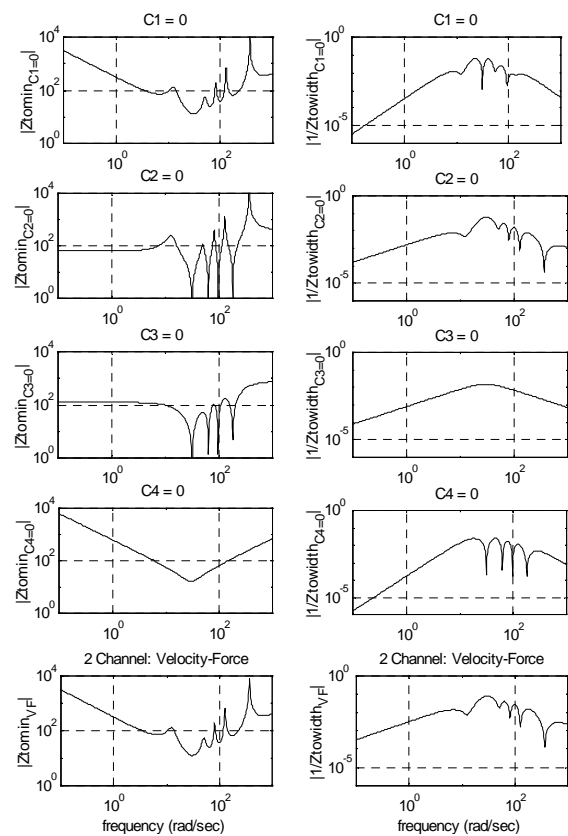


그림 4. 최적화된 투명성 조건에서의 성능평가
시간지연 Td = 100(msec)
Figure 4. Performance evaluation for transparency-optimized architecture with Td=100(msec)

성능사이에 확실한 tradeoff 가 있음을 보여 주었다. Local force feedback은 성능에 복합된 영향을 주었고, Local force/position feedback을 올리는 것이, 안정성을 향상 시켰다[2]. 3채널의 경우, 모드I은 slave damping을 높이는 것과 local master force feedback C_6 를 높이는 것이 시스템을 안정하게 하며, 반대로 coordinating force feedforward C_4 를 감소시키는 것이 시스템의 안정성을 높인다는 것을 알 수 있었다. 모드II에서는 master damping을 올리는 것과 coordinating force feedforward C_1 을 감소시키는 것이 시스템의 안정성을 높인다는 것을 알 수 있었다. 성능면에 있어서는 모드I, II 모두 local force feedback을 감소 시키는 것이 Z-width를 증가시켰다. 반면 coordinating force feedforward를 증가시키는 것이 Z-width를 증가시켰다. 그림3, 4는 4채널 중, 각각 하나의 채널이 없는 모든 경우에 대하여 분석한 결과와 2채널의 Velocity-Force control architecture를 보여준다. 이 논문에 소개되지 않았지만, coordinating feedforward parameter C_1, C_4 가 없는 경우에 대해서도 시뮬레이션 하였다. 그림에서 보듯이 transparency-optimized architecture 일 경우, 3채널의 각 모드는 2채널에 비해, 안정성 면에서 떨어졌다. 그러나 앞서 분석한 C_2, C_3 가 없는 모드의 성능이 우수하다는 것을 알 수 있었다[2].

5. 결론

3채널의 안정성을 분석하기 위해, Llewellyn의 절대 안정도 판별법을 사용하였고, 성능평가를 위해, 주로봇과 종로봇 양쪽 각각에 전송 되어 지는 임피던스의 최소값(minimum value)과 Z-width를 통해서 성능을 평가하였다. 안정성에 있어서,

C_2, C_3 각각이 없는 3채널의 경우, 2채널에 비하여, 안정성이 떨어진다는 것을 알 수 있었고, 2채널처럼 feedforward parameter C_4, C_1 를 감소시키는 것이 안정성을 높이는 방법이 되었다. 성능면에 있어서 3채널의 C_2, C_3 가 없는 경우 우수 하다는 것을 알 수 있었다.

참고문헌

- [1] Hashtudi-Zadd K. and S.E. Salcudean, "On the Use of Local Force Feedback for Transparent Teleoperation," *Proc. IEEE Int.Conf. Robotics and Automation*, pp.1863-1869, Detroit, MI, 1999.
- [2] Hashtudi-Zadd K. and S.E. Salcudean, "Analysis and Evaluation of Stability and Performance Robustness for Teleoperation Control Architectures," *Proc. IEEE Int.Conf. Robotics and Automation*, pp. 3107-3113, San Francisco, CA, 2000.
- [3] Lawrence D.A., "Stability and Transparency in Bilateral Teleoperation," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, Vol. 9, No. 5, pp. 624-637, Oct. 1993.
- [4] Yokokohji Y. and T. Yoshikawa, "Bilateral Control of Master-Slave Manipulators for Ideal Kinesthetic Coupling-Formulation and Experiment," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol.10, No. 5, pp. 605-620, 1994.
- [5] Haykin S.S., "Active Network Theory," Addison-Wesley, 1970.
- [6] Colgate J.E. and J.M.Brown, "Factors Affecting the Z-width of a Haptic Display," *Proc. IEEE Int. Cont. Robotics and Automation*, pp. 3205-3210, San Diego, CA, 1994.