

웨이브 변수 기반 원격조작시스템의 안정성 및 성능 해석

서일홍*(한양대학교 정보통신대학원), 김형욱(한양대학교 전자공학과)

Stability and Performance Analysis of Wave Variable based Teleoperation System

I. H. Suh(Info. and Comm. Dept., Hanyang Univ.), H. W. Kim(Elect. Eng. Dept., Hanyang Univ.)

ABSTRACT

In this paper, the stability and performance analysis of wave-based teleoperation system is presented. For stability and performance analysis with respect to the variation of characteristic impedance b , loop gains of communication channel and minimum value of transmitted impedance from slave side to the master side are considered. The stability of slave side may be enhanced by increasing characteristic impedance b , whereas excessively high value of b may degrade the performance, which imply a tradeoff between stability and performance.

Key Words : Teleoperation, Wave Variable, Transmitted Impedance,

1. 서론

최근들어 로봇은 산업현장 뿐만 아니라 인간에게 친밀하게 다가서고 있으며 애완 로봇, 휴머노이드 로봇, 서비스 로봇, 극한 작업용 로봇과 같이 사회의 여러 분야에서 다양하게 사용되고 있다. 이 중에서도 우주 공간에서의 작업, 원자로 내의 작업, 심해저에서의 작업, 광산이나 지하, 붕괴된 건물 속에서의 작업 등과 같은 극한 작업의 경우는 돌발적인 상황이 많이 발생하는 작업들로서, 로봇 제어 기술이 발달하고 성능이 많이 향상 되었다고는 하지만 순간순간 변하는 상황에 대처하기 힘들기 때문에 작업자가 원격으로 직접 로봇을 조작하게 된다.

원격조작시스템은 그림1과 같은 블록도로 나타낼 수 있는데 일반적으로 주로봇, 종로봇 그리고 통신 채널로 구성된다.

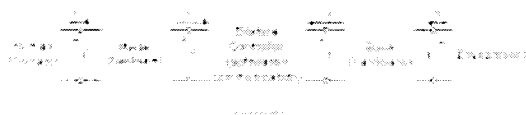


Fig. 1 2-port network model of teleoperation system

주로봇은 작업자의 조작을 직접적으로 받아서 종로

봇에 보낼 명령을 생성하고, 종로봇은 주로봇으로부터 받은 명령을 추종하게 된다. 주로봇의 명령을 추종하는 동안 종로봇은 현재의 종로봇의 위치나 접촉시의 힘 등을 주로봇에 알려주어 작업자가 작업환경을 느낄 수 있도록 한다.

원격조작시스템의 해석 및 안정화에 관한 연구로 Lawrence¹는 4채널 구조를 제안하고 이상적인 경우에 대하여 투명성과 안정성을 만족하는 채널 제어기를 설계하는 방법을 제안하였고, Salcudean^{3,4}은 local force feedback을 이용하면 안정성을 높이면서, 힘정보가 전달되는 채널중에서 한 채널을 쓰지 않아도 됨을 보였다. 또한, 4채널중에서 2개씩의 채널을 선택하고 Llewellyn의 절대안정도 판별법과 전달 임피던스의 최소값과 범위를 이용하여 각각의 모드별로 안정성과 성능을 분석하였다. Anderson과 Spong²은 시불변 시간 지연이 존재하는 원격조작시스템에 대하여 수동성과 scattering 이론⁵을 단간으로 하는 제어 방법을 제안하였으나, 기계시스템을 전기회로로 모델링함으로써 의미가 직관적이지 못하였고, 특히 다자유도 시스템의 경우에 제어구조가 상당히 복잡해지는 단점이 있었다. 이후에 Niemeyer와 Slotine^{6,7}은 통신 채널에 시간 지연이 존재하더라도 원격조작시스템이 안정하도록 웨이브 변수를 도입하였다. 이들 역시 수동성과 scattering

이론을 기반으로 하지만, 기계시스템을 표현하는데 전기회로를 사용하지 않음으로 하여 물리적으로 직관적인 의미를 갖도록 하였다. 최근에도 웨이브 변수 기반 원격조작시스템에 predictor⁸를 사용하여 시스템의 성능을 향상시키는 등의 연구가 계속되고 있다. 하지만, 대부분의 연구가 주/종로봇의 위치 오차를 줄이는 등과 같은 성능 향상에 초점을 맞추고 있을 뿐으로 웨이브 변수의 특성 임피던스 b 가 성능 및 안정성에 미치는 영향에 대한 해석이 없었다.

따라서, 본 논문에서는 웨이브 변수 기반 원격조작시스템에 대하여 종로봇에서 조작자쪽으로 전달되는 임피던스의 최소값을 성능 지수로하여 특성 임피던스 b 의 변화에 따른 안정성과 성능 변화를 해석하고자 한다.

2. 웨이브(Wave) 변수

2.1 정의

웨이브 변수는 파워 변수인 속도 \dot{x} 와 힘 F 를 인코딩한 값으로 식(1)과 같이 정의될 수 있다.

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

여기서, u 는 오른쪽 방향으로 진행되는 웨이브, v 는 왼쪽 방향으로 진행되는 웨이브, b 는 웨이브의 특성 임피던스를 나타낸다.

식(1)을 이용하여 주로봇단에서의 u_m , F_m 과 종로봇단에서의 v_s , \dot{x}_s 에 대하여 정리하면 식(2), 식(3)과 같다.

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

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

여기서, \dot{x}_m 은 주로봇의 속도, \dot{x}_s 은 종로봇의 속도명령, F_m 은 개환 힘신호, F_s 는 측정된 종로봇의 힘을 의미한다.

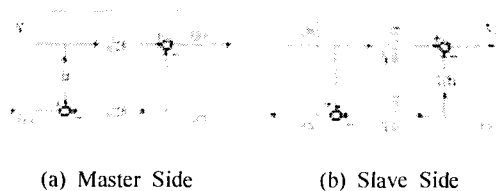


Fig. 2 Structure of wave transformation

식(2), 식(3)을 이용하여 주로봇과 종로봇측에서

사용되는 웨이브 변환을 구성해보면 그림2와 같고, 웨이브 변수로 표현된 양방향 원격조작시스템의 전체 구조는 그림3과 같다.

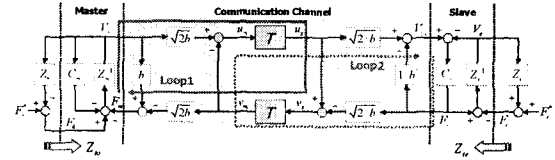


Fig. 3 Wave variable-based teleoperation system

2.2 안정성 평가

임의의 시스템이 수동성 관점에서 안정하기 위해서는 다음과 같은 수동성 조건을 만족해야 한다.

$$\int_0^t P_m d\tau \geq -E_{store}(0), \quad \forall t \geq 0 \quad (4)$$

여기서, $E_{store}(0)$ 는 초기에 시스템에 저장된 에너지를 나타낸다.

시스템의 입력 파워는 웨이브 변수를 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$P_m = \dot{x}^T F = \frac{1}{2} u^T u - \frac{1}{2} v^T v \quad (5)$$

여기서, u 는 시스템의 입력 웨이브이고 v 는 시스템의 출력 웨이브이다.

식(5)를 식(4)에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

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

즉, 출력 에너지는 초기에 저장된 에너지와 입력 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.

$$P_m = \dot{x}_m^T F_m - \dot{x}_s^T F_s \quad (7)$$

여기서, 주로봇단으로부터 통신 채널로의 입력을 양(positive), 통신 채널에서 종로봇단으로의 출력은 음(negative)으로 가정한다.

식(7)에 웨이브 변수를 대입하여 정리하면 식(8)과 같다.

$$P_m = \frac{1}{2} u_m^T u_m - \frac{1}{2} v_m^T v_m - \frac{1}{2} u_s^T u_s + \frac{1}{2} v_s^T v_s \quad (8)$$

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

$$u_s(t) = u_m(t-T), v_m(t) = v_s(t-T) \quad (9)$$

$$P_m = \frac{1}{2} u_m^T(t) u_m(t) - \frac{1}{2} u_m^T(t-T) u_m(t-T) + \frac{1}{2} v_s^T(t) v_s(t) - \frac{1}{2} v_s^T(t-T) v_s(t-T) \quad (10)$$

$$= \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} \int_{t-T}^t u_m^T(\tau) u_m(\tau) + v_s^T(\tau) v_s(\tau) d\tau \right)$$

따라서, 통신 채널에 저장된 에너지는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_{store}(t) = \int_0^t P_m dt \quad (11)$$

$$= \int_{t-T}^t \left(\frac{1}{2} u_m^T u^T + \frac{1}{2} v_m^T v^T \right) dt \geq 0$$

웨이브 변수의 형태로 나타내게 되면 파워는 식(11)에서와 같이 시간 지연이 있더라도 지연된 시간에 해당하는 파워가 네트워크에 저장되고, 그 값은 u 와 v 의 각각의 제곱 형태가 되어 항상 양수이므로 시스템의 수동성이 보장된다. 즉, 양방향 원격조작시스템의 통신 채널에 시간 지연이 발생하여도 웨이브 변수의 형태로 나타내면 시간 지연에 강인함(robustness)을 가지게 된다.

한편, 웨이브 변수의 특성 임피던스 b 가 안정성에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 그림3에서 루프1과 루프2의 이득을 각각 구해보면 식(12)와 같다.

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

그림4는 b 값의 변화에 따른 루프 이득을 그린 그래프이다.

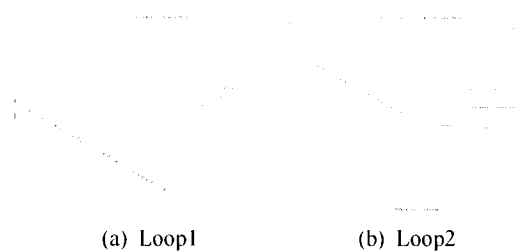


Fig. 4 Plot of loop gains with different b

루프1과 루프2는 모두 양의 반환(positive feedback)이고, b 의 값에 따라 루프 이득을 그려보면 b 의 값이 작을 때는 루프2의 이득값이 루프1의 이득값에 비해 매우 크므로 종로봇단을 안정화시키려면 루프2의 이득값을 줄이도록 b 의 값을 증가시켜 주는 것이 좋다.

2.3 웨이브 변수 기반 원격조작시스템의 성능 평가

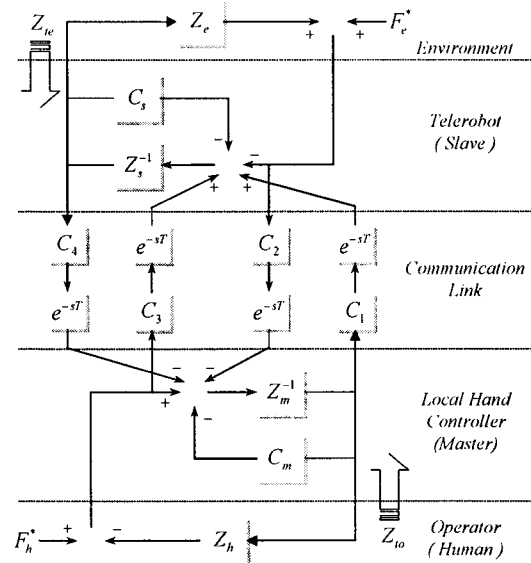


Fig. 5 Block diagram of Lawrence 4-channel teleoperation architecture

그림3의 구조에서 주로봇단에서의 입력과 출력을 살펴보면 종로봇으로의 출력은 속도이고 종로봇으로부터의 입력은 힘으로, 이는 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 피드백을 통한 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 b 값의 변화가 시스템의 성능에 미치는 영향을 구체적으로 분석하고자 한다.

웨이브 변수를 적용한 시스템의 성능을 평가하기 위하여 그림3의 구조에서 네트워크의 입력을 (V_h, F_c) , 출력을 (F_h, V_c) 로 선택하면 2포트 네트워크의 하이브리드 파라미터는 식(13)과 같이 정의

될 수 있다⁹.

$$\begin{pmatrix} F_h \\ -V_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_h \\ F_c \end{pmatrix} \quad (13)$$

일반적으로 원격조작시스템의 성능은 투명성(transparency)로 나타내는데, 환경의 임피던스 Z_c 와 조작자에게 전달된 임피던스 Z_o 간의 관계를 의미하며 식(14)와 같이 정의된다. 이상적인 경우에 완벽한 투명성은 조작자가 느끼는 임피던스 Z_o 가 환경의 임피던스 Z_c 와 같음을 의미한다.

$$Z_o = \left. \frac{F_h}{V_h} \right|_{\dot{h}_i=0} = \frac{h_{11} + (h_{11}h_{22} - h_{12}h_{21})Z_c}{1 + h_{22}Z_c} \quad (14)$$

4채널 네트워크 구조에서 속도-힘 채널만 사용하는 경우와 웨이브 변수를 사용한 네트워크 구조의 하이브리드 파라미터는 각각 식(15), 식(16)과 같다.

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

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

여기서, $Z_{cm} = Z_m + C_m$, $Z_{cs} = Z_s + C_s$,

$\Gamma = e^{-2sT} (1 + e^{-2sT})^{-1}$ 이다.

투명성을 정량적으로 기술하기 위하여 Z_o 가 0일 때 즉, 종로봇이 자유공간에서 환경과의 접촉이 없이 움직이는 경우에 전달 임피던스 Z_o 의 최소값은 식(17)과 같이 구할 수 있다.

$$Z_{o\min} = Z_o|_{Z_c=0} = h_{11} \quad (17)$$

투명성이 좋다는 것은 $|Z_{o\min}| \rightarrow 0$ 을 의미한다.

식(15)와 식(16)을 식(17)에 대입하여 정리하면 각각 식(18), 식(19)와 같다.

$$Z_{o\min:Lawrence} = Z_{cm} \quad (18)$$

$$Z_{o\min:Wave} = Z_{cm} + \frac{(2\Gamma-1)bC_s Z_c(2\Gamma-1) - b^2 Z_{cs}}{bZ_{cs} - C_s Z_c(2\Gamma-1)} \quad (19)$$

식(19)에서와 같이 b 값의 변화에 따라 4채널 구조와 웨이브 변수를 사용한 구조에서 $Z_{o\min}$ 은 식(20)만큼 차이가 나므로 b 값이 커질수록 2.2절에서 언급한 바와 같이 안정성면에서는 좋아지지만, 성능면에서는 Z_o 의 최소값이 커지게 되므로 특정 주파수대에서 성능이 안좋아지게 될 것임을 예측할 수 있다.

$$\frac{(2\Gamma-1)(bC_s Z_c(2\Gamma-1) - b^2 Z_{cs})}{bZ_{cs} - C_s Z_c(2\Gamma-1)} \quad (20)$$



Fig. 6 Z_o minimum plot of (a)velocity-force mode of 4-channel architecture and (b)wave-based architecture with different b

그림6(a)와 (b)는 각각 4채널 네트워크 구조에서 속도-힘 모드의 $Z_{o\min}$ 과 웨이브 변수를 적용한 네트워크 구조에서 b 값의 변화에 따른 $Z_{o\min}$ 을 계산한 그래프이다. 주어진 모의실험 환경에서 b 의 값이 1일 경우에는 두 구조가 같은 성능을 보이지만 b 의 값이 100일 경우를 보면 특정 주파수 대역에서 Z_o 의 최소값이 약 50배정도 증가함을 알 수 있다.

(a) $b=1$ (b) $b=25$

(c) $b=250$

Fig. 7 Position response of master/slave robot with different b

그림7은 b 값의 변화에 따른 주로봇과 종로봇의

위치응답으로, $b=1$ 인 경우에는 종로봇이 안정화되지 못하고 진동함을 알 수 있고, $b=250$ 인 경우는 주로봇과 종로봇 모두 안정화가 되기는 하지만 수렴속도가 늦어지므로 성능이 안좋아진다고 할 수 있다.

따라서, 안정성과 성능을 비교해보면 안정성을 위해서 b 를 증가시키는 것이 좋지만 b 의 값이 계속 커지면 Z_{1min} 의 값이 커지게 되어 성능이 나빠지므로 적절한 b 의 값을 선택하는 것이 좋다.

5. 결론

본 논문에서는 4채널 구조의 성능 해석 방법을 웨이브 변수를 적용한 원격조작시스템에 도입하여 성능 및 안정성을 분석하였고, 특성 임피던스 b 가 성능과 안정성에 미치는 영향을 정성적으로 분석하였다.

추후 연구로 양방향 원격조작시스템의 안정성은 수동성 관점에서 안정한지만을 검사할 뿐 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.

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. R. J. Anderson and M. W. Spong, "Bilateral Control of Teleoperators with Time Delay," *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol.34, No.5, pp.494-501, 1989
3. 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
4. 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
5. G. Niemeyer and J. E. Slotine, "Stable Adaptive Teleoperation," *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Vol.16, No.1, p.152-162, 1991
6. 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

7. 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
8. Saghir Munir and Wayne J. Book, "Internet-based Teleoperation Using Wave Variables with Prediction," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol.7, No.2, pp.124-133, 2002
9. S. S. Haykin, "Active Network Theory," Addison-Wesley, 1970