

웨이브변수를 이용한 원격조작시스템에서의 특성 임피던스에 따른 성능 해석

김우용, 김형욱, 서일홍

Performance Analysis of Bilateral Teleoperation System using Characteristic Impedance of Wave variable

Woo Yong Kim, Hyung Wook Kim, Il Hong Suh

Abstract - 원격조작시스템은 일반적으로 주로봇, 종로봇과 이들을 연결하는 통신채널로 구성되는데, 통신채널에는 반드시 시간 지연이 존재하고 이는 전체 시스템을 불안정하게 만드는 가장 큰 요인으로 알려져 있다. 시간 지연으로 인한 불안정성 문제를 해결하기 위한 연구가 활발히 진행되어 왔는데, 최근에는 웨이브변수를 적용한 원격조작시스템이 많이 사용되고 있다. 웨이브변수를 적용하면 통신채널에 시간지연이 존재하더라도 수동성 관점에서 안정성을 보장할 수 있고, 다른 제어방법에 비하여 구조가 간단하기 때문에 구현하기도 용이한 장점이 있으나, 특성 임피던스에 따른 성능 변화를 해석한 연구는 없었다. 따라서, 본 논문에서는 웨이브변수를 도입한 원격조작시스템에 대하여 특성 임피던스에 따른 성능을 투명성의 관점에서 해석하고자 한다. 또한, 시간 지연이 존재하는 원격조작시스템에 웨이브 변수를 적용한 실험을 통하여 시간지연 시스템에 대한 웨이브 변수의 강인성을 보이고자 한다.

1. 서 론

과학기술이 발달함에 따라 많은 분야에서 로봇의 사용과 필요성이 늘어나고 있다. 최근에는 산업현장 뿐만 아니라 애완 로봇, 휴머노이드 로봇, 서비스 로봇, 극한 작업용 로봇, 로봇을 이용한 수술 등 사회의 여러 분야에서 다양하게 사용되고 있다.

특히, 원자로내의 작업, 심해저에서의 작업, 광산이나 지하 붕괴된 건물 속에서의 작업등 작업 절차가 복잡하고 돌발적인 상황이 발생하는 곳에서 사용되는 로봇들은 순간순간 변하는 상황에 대처하기 위해 원격으로 작업자가 직접 조작하는 로봇을 이용하고 있다. 원격지에서 작업자가 이 로봇들을 조작한다면 위험한 상황이나 돌발적인 상황이 발생하더라도 작업자의 안정성을 확보하면서 능동적으로 대처할 수 있다는 장점이 있다.

원격조작시스템은 일반적으로 주로봇과 종로봇, 그리고 통신채널로 구성된다. 주로봇은 작업자의 조작을 직접적으로 입력받아서 종로봇으로 보낸 명령을 생성하고, 종로봇은 주로봇으로부터 받은 명령을 추종하게 된다. 주로봇의 명령을 추종하는 동안 종로봇은 현재의 종로봇의 위치나 접촉 여부 등을 주로봇에 알려주어 작업자가 작업환경 느낄 수 있도록 한다.

원격조작시스템이 안정적으로 동작하기 위해서는 주로봇과 종로봇, 통신채널이 모두 안정해야 하지만, 통신채널에 존재하는 시간 지연은 전체 시스템을 불안정하게 하는 가장 큰 요인으로 알려져 있다.

그림 1은 네트워크 모델로 표현된 일반적인 원격조작시스템의 구조이다.



그림 1. 2포트 네트워크 모델로 표현된 원격조작시스템

원격조작시스템의 해석 및 안정화에 관한 연구로 H. Zaad와 Salcudean은 [2, 3]에서 전달되는 데이터의 종류에 따라 동작 모드를 나누고 각각의 경우에 대한 안정도 조건과 성능을 분석하였다. Hannaford와 Ryu는 [4, 5]에서 네트워크 시스템을 불안정하게 하는 에너지의 흐름을 관측하고, 시스템을 불안정하게 하는 에너지를 강제로 소모시켜 안정화하도록 하는 시간영역에서의 수동성 관측기/제어기를 제안하였지만, 통신 채널에 존재하는 시간 지연에 대한 해결방법은 제시하지 않았다. Niemeyer와 Slotine은 [6, 7]에서 통신 채널에 시간 지연이 존재하더라도 원격조작시스템이 안정하게 동작하도록 하기 위하여 수동성을 기반으로 한 웨이브 변수를 도입하였는데, 웨이브 변수의 특성 임피던스가 원격조작시스템의 성능에 미치는 영향에 대한 해석이 없었다.

따라서, 본 논문에서는 원격조작시스템의 주로봇과 종로봇 간의 통신 채널에 시간 지연이 존재하더라도 안정성을 확보하기 위하여 웨이브 변수를 도입하고, 특성 임피던스의 변화에 따른 시스템의 성능 변화를 해석하고자 한다.

2. 본 론

2.1 웨이브 변수(Wave Variable)

웨이브 변수는 식 (21)과 같이 파워 변수인 속도 x 과 힘 F 의 정보를 인코딩한 값으로 정의된다.

$$u = \frac{bx + F}{\sqrt{2b}}, v = \frac{bx - F}{\sqrt{2b}} \quad (21)$$

여기서, u, v, b 는 각각 오른쪽 방향으로 움직이는 웨이브, 왼쪽 방향으로 움직이는 웨이브, 그리고 웨이브의 특성 임피던스를 나타낸다.

식 (21)을 이용하여 주로봇단에서의 u_m, F_m 과 종로봇단에서의 v_s, x_s 에 관하여 정리하면 식 (22), 식 (23)과 같다.

$$u_m = \sqrt{2b} x_m - v_m, F_m = bx_m - \sqrt{2b} v_m \quad (22)$$

$$v_s = u_s - \sqrt{\frac{2}{b}} F_s, x_s = \sqrt{\frac{2}{b}} u_s - \frac{F_s}{b} \quad (23)$$

여기서, x_m 은 주로봇의 속도, x_s 은 종로봇이 추종해야 하는 속도 명령, F_m 은 주로봇으로의 입력 힘, F_s 는 종로봇의 제어 입력 힘을 각각 의미한다.



(a) 주로봇단의 웨이브 변환 (b) 종로봇단의 웨이브 변환
그림 2. 웨이브 변환 구조

식 (22), 식 (23)을 이용하여 주로봇과 종로봇측에서

사용되는 웨이브 변환을 블록도로 표현해보면 그림 2와 같고, 웨이브 변수로 표현된 양방향 원격조작시스템의 전체 구조는 그림 3과 같다.

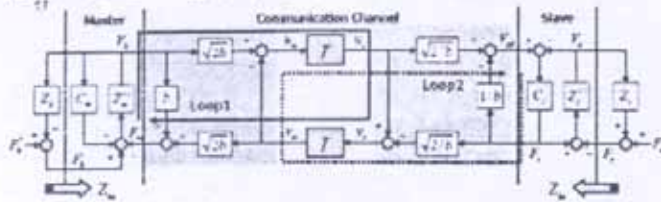


그림 3. 웨이브 변수 기반 원격조작시스템

2.2 안정성 평가

임의의 시스템이 수동성을 유지하려면 다음의 조건을 만족하여야 한다.

$$\int_0^t P_m d\tau \geq -E_{store}(0), \forall t \geq 0 \quad (2.4)$$

여기서, P_m 은 시스템에 공급되는 파워이고, $E_{store}(0)$ 는 초기에 시스템에 저장되어 있는 에너지를 나타낸다.

식 (2.4)를 웨이브 변수의 형태로 나타내면 다음과 같다.

$$\int_0^t \frac{1}{2} v^T v d\tau \leq \int_0^t \frac{1}{2} u^T u d\tau + E_{store}(0), \forall t \geq 0 \quad (2.5)$$

여기서, u 는 시스템으로의 입력 웨이브이고, v 는 시스템의 출력 웨이브이다. 즉, 출력되는 웨이브 에너지는 초기에 저장된 에너지와 입력 웨이브 에너지의 합의 크기보다 작아야 함을 의미한다.

통신 채널에 입력되는 총 파워를 구해보면 다음과 같다.

$$P_m = x_m^T F_m - x_s^T F_s \quad (2.6)$$

주로봇으로부터 통신채널로의 입력을 양(positive), 통신 채널에서 종로봇으로의 출력을 음(negative)으로 정의할 때, 식 (2.6)에 웨이브 변수를 대입하여 정리하면 식 (2.7)과 같다.

$$P_m = \frac{1}{2} u_m^T u_m - \frac{1}{2} v_m^T v_m - \frac{1}{2} u_s^T u_s + \frac{1}{2} v_s^T v_s \quad (2.7)$$

통신 채널에 시간 지연 T 가 존재하면 식 (2.8)의 관계가 성립하므로 통신 채널에 저장된 에너지는 식 (2.9)과 같이 구해질 수 있다.

$$u_s(t) = u_m(t-T), v_m(t) = v_s(t-T) \quad (2.8)$$

$$E_{store}(t) = \int_0^t P_m d\tau = \int_{t-T}^t \left(\frac{1}{2} u_m^T u_m + \frac{1}{2} v_s^T v_s \right) d\tau \geq 0 \quad (2.9)$$

즉, 통신 채널의 파워 변수인 \dot{x} 과 F 를 웨이브 변수의 형태로 변환하면 통신 채널에 시간 지연 T 가 존재하더라도 그 만큼의 에너지가 통신 채널에 저장될 뿐 수동성 조건을 위배하지 않기 때문에 시간 지연에 강인함을 가짐을 알 수 있다.

2.3 웨이브 변수 기반 원격조작시스템의 성능평가

그림 3의 구조에서 종로봇으로의 출력은 속도이고, 종로봇으로부터의 입력은 힘으로, 이는 그림 4와 같은 Lawrence의 4채널 구조 원격조작시스템[1]에서 채널3과 채널4를 쓰지 않는 경우와 유사함을 알 수 있다.

차이점으로는 4채널 구조에서는 주로봇단과 종로봇단 사이에 속도와 힘 정보가 독립적인 채널을 통하여 전송되므로 성능 분석이 용이하나, 웨이브 변수를 사용하는 구조는 채널간의 커플링이 존재하므로 상대적으로 해석이 어렵다. 따라서, 본 논문에서는 기존의 4채널 구조의 성능 분석에 사용된 2포트 네트워크의 해석 방법을 웨이브 변수를 적용한 네트워크 시스템에 적용하여 특성 임피던스 b 값의 변화가 시스템의 성능에 미치는 영향을 구체적으로 분석하고자 한다.

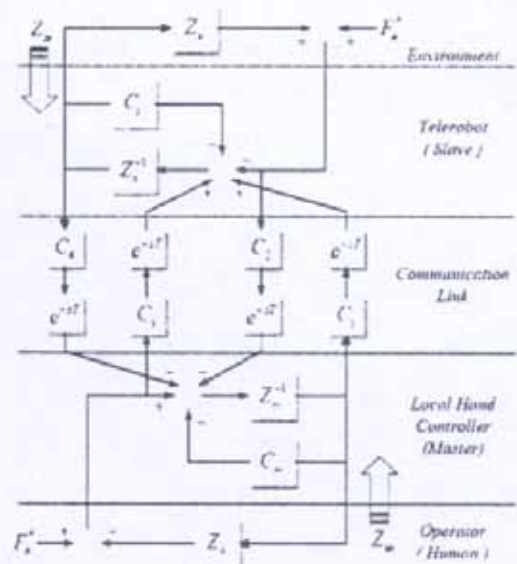


그림 4. Lawrence의 4채널 구조의 원격조작시스템

웨이브 변수를 적용한 시스템의 성능을 평가하기 위하여 그림 3의 구조에서 네트워크의 입력을 (V_h, F_r)로, 출력을 ($F_h - V_r$)로 선택하면 2포트 네트워크의 하이브리드 파라미터는 식 (2.10)과 같이 정의 될 수 있다.

$$\begin{pmatrix} F_h \\ -V_r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_h \\ F_r \end{pmatrix} \quad (2.10)$$

원격조작시스템의 성능은 투명성(transparency)로 나타내는데, 환경 임피던스 Z_e 와 조작자에게 전달된 임피던스 Z_w 간의 관계를 의미하며, 이상적인 경우 완벽한 투명성은 Z_w 와 Z_e 가 같음을 의미한다.

$$Z_w = \left. \frac{F_h}{V_h} \right|_{F_r=0} = \frac{h_{11} + (h_{12}h_{22} - h_{21}h_{11})Z_e}{1 + h_{22}Z_e} \quad (2.11)$$

4채널 네트워크 구조에서 속도-힘 채널만 사용하는 경우의 하이브리드 파라미터 값들은 식 (2.12)과 같다.

$$h_{11: Lawrence} = Z_{cm}, h_{12: Lawrence} = C_2 e^{-sT} \quad (2.12)$$

$$h_{21: Lawrence} = -\frac{C_1 e^{-sT}}{Z_{cs}}, h_{22: Lawrence} = \frac{1}{Z_{cs}}$$

웨이브 변수를 사용한 네트워크 구조의 하이브리드 파라미터 값들을 구해보면 식 (2.13)와 같이 구해질 수 있다.

$$h_{11: Wave} = Z_{cm} + \frac{(2\Gamma - 1)bC_s Z_s (2\Gamma - 1) - b^2 Z_{cs}}{bZ_{cs} - C_s Z_s (2\Gamma - 1)}$$

$$h_{12: Wave} = \frac{2e^{-sT}}{1 + e^{-2sT}} \left(1 - \frac{bZ_s - C_s Z_s (2\Gamma - 1)}{bZ_{cs} - C_s Z_s (2\Gamma - 1)} \right) \quad (2.13)$$

$$h_{21: Wave} = -\frac{2bC_s (1 - \Gamma)e^{-sT}}{bZ_{cs} - C_s Z_s (2\Gamma - 1)}$$

$$h_{22: Wave} = \frac{b - C_s (2\Gamma - 1)}{bZ_{cs} - C_s Z_s (2\Gamma - 1)}$$

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_w 가 0일 때 즉, 종로봇이 자유공간에서 환경과의 접촉이 없이 움직이는 경우에 전달 임피던스 Z_w 의 최소값은 식 (2.14)와 같다. 투명성이 좋다는 것은 $|Z_{tomin}| \rightarrow 0$ 을 의미한다.

$$Z_{tomin} = Z_w |_{Z_e=0} = h_{11} \quad (2.14)$$

식 (2.12)과 식 (2.13)을 식 (2.14)에 대입하여 정리하면

각각 식 (2.15), 식 (2.16)과 같다.

$$Z_{\text{tomin: Lawrence}} = Z_{\text{cm}} \quad (2.15)$$

$$Z_{\text{tomin: Wave}} = Z_{\text{cm}} + \frac{(2\Gamma-1)(bC_s Z_s(2\Gamma-1) - b^2 Z_{cs})}{bZ_{cs} - C_s Z_s(2\Gamma-1)} \quad (2.16)$$

식 (2.16)에 따르면 b 값의 변화에 따라 4채널 구조와 웨이브 변수를 사용한 구조에서 Z_{tomin} 은

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

만큼 차이 나므로 b 값이 커질수록 원격조작시스템이 고주파 대역에서는 Z_{in} 의 최소값이 커지게 되므로 성능이 나빠지게 된다.

3. 실험

그림 5는 원격조작시스템을 구성하는 1자유도 주로봇과 종로봇이다. 주로봇과 종로봇에는 3.7:1 기어와 1000 펄스의 해상도를 가지는 엔코더가 장착된 DC모터가 사용되었고, 제어시스템은 P4 2.4GHz CPU와 Windows XP를 기반으로 구현하였다.



(a) 주로봇 (b) 종로봇

그림 5. 1자유도 원격조작시스템

통신 채널에 시간 지연이 없을 경우의 실험 결과는 그림 6과 같다.

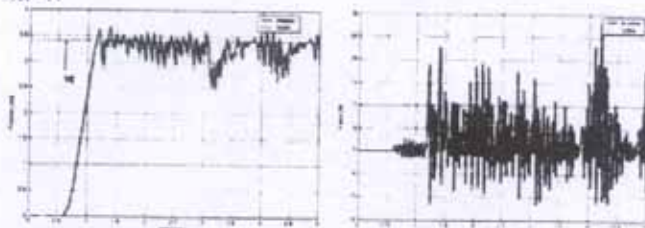


(a) 주로봇/종로봇의 위치 응답 (b) 종로봇의 힘 응답

그림 6. 주로봇/종로봇의 위치/힘 응답

종로봇이 주로봇의 움직임을 안정적으로 추종하고, 시스템이 안정함을 알 수 있다. 그림 6(a)에서 정상상태에서 주로봇과 종로봇의 위치응답이 차이가 나는 이유는 종로봇이 벽과 접촉해 있어서 더 이상 움직이지 못하기 때문이다.

통신 채널에 시간 지연이 존재하는 경우의 위치 응답과 힘은 그림 7과 같다. 주로봇과 종로봇의 위치의 변화가 심하게 나타나며 시스템이 안정적이지 못함을 알 수 있다.

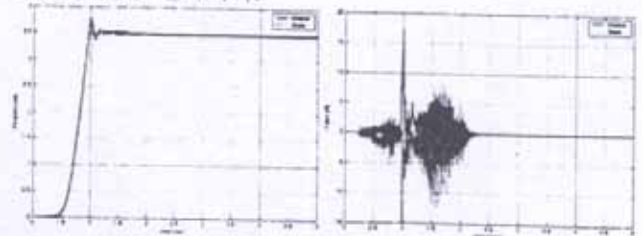


(a) 주로봇/종로봇의 위치 응답 (b) 종로봇의 힘 응답

그림 7. 주로봇/종로봇의 위치/힘 응답(시간지연: 20m[sec])

다음 그림 8은 주로봇과 종로봇 사이의 통신채널에 20[msec]의 시간 지연이 존재하는 경우에 웨이브 변수를

적용한 실험 결과이다.



(a) 주로봇/종로봇의 위치 응답 (b) 종로봇의 힘 응답

그림 8. 주로봇/종로봇의 위치/힘 응답(시간지연: 20m[sec], $b=1.4$)

그림 8과 같이 통신채널에 시간지연이 존재하는 경우에도 웨이브 변수를 적용하면 시스템이 안정하고, 종로봇이 주로봇의 움직임을 잘 추종하는 것을 알 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 통신 채널에 시분변 시간 지연이 존재하는 양방향 원격조작시스템의 안정성을 보장하기 위하여 웨이브 변수를 적용할 때, 특성 임피던스 값에 따른 성능 변화를 투명성관점에서 분석하였고, 시간 지연으로 인해 불안정해진 원격조작시스템에 웨이브 변수를 적용하여 시스템이 안정화되는 것을 실험을 통하여 검증하였다.

[참고 문헌]

- [1] D. A. Lawrence, "Stability and Transparency in Bilateral Teleoperation," IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol.9, p.624-637, 1993
- [2] K. Hashtrudi-Zaad and S. E. Salcudean, "Analysis and Evaluation of Stability 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, "Transparent 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.1-10, 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