

## 양방향 시간 지연에서 안전한 원격제어 방안 연구

이찬일\*, 용석정

LIG 넥스원

chanil.lee@lignex1.com, sukjung.yong2@lignex1.com

## A Study on Safe Teleoperation with Bilateral Time Delay

Lee Chan Il, Yong Suk Jung

LIG Nex1 Co.

## 요 약

본 논문은 네트워크 지연현상이 존재하는 상황에서 안정적인 양방향 원격제어 프레임워크를 제안한다. 양방향 원격제어 상황에서 시간지연이 존재할 경우 마스터 장치(운용자)에서 전달하는 에너지가 슬레이브(로봇시스템)에서 생성할 수 있는 에너지보다 더욱 많이 생성하게 될 수 있다. 이 경우 에너지의 양이 넘쳐 슬레이브에서 불안정한 상황이 발생할 수 있다. 그리고 슬레이브가 불안정한 상황이 발생함에 따라 마스터 장치로 피드백되는 에너지로 인해 마스터 장치에서 생성되는 에너지 보다 넘치게 되어 양방향에서 불안정해지는 상황이 발생할 수 있다. 본 논문에서 이러한 불안정한 에너지 흐름을 모니터링하여 에너지가 불안정해질 때 안정적으로 원격제어를 할 수 있도록 생성할 수 있는 에너지만큼만 에너지 흐르게 만들고 넘치는 에너지를 흡수하는 수동성 제어기를 제안한다.

## I. 서론

원격제어(Teleoperation)는 물리적으로 떨어져 있는 시스템을 제어하는 중요한 기술로, 원격 환경에서의 작업 수행을 가능하게 한다. 특히, 햅틱 피드백(Haptic Feedback)을 통한 촉각 정보를 제공하는 원격 조작은 사용자가 물리적 환경과의 상호작용을 직관적으로 경험하게 하며, 원격 수술, 우주 탐사, 산업 자동화 등 다양한 분야에서 중요한 역할을 하고 있다 [1][2]. 그러나 네트워크 지연(latency)은 이러한 시스템에서 큰 도전 과제가 된다. 지연이 발생하면 제어 시스템의 응답성이 저하되고, 햅틱 피드백이 시간적으로 비정상적인 방식으로 전달되어 사용자의 조작 감각을 왜곡시킬 수 있다[3].

시간 지연 문제를 해결하기 위한 여러 방법들이 제안되었으나, 여전히 많은 도전 과제가 남아 있다. 예를 들어, 패시브 제어 기법을 기반으로 한 연구에서는 안정성을 유지하려는 시도가 있었으나, 지연이 길어질 경우 여전히 시스템 성능이 저하되는 문제가 발생한다. 예측 기반 제어(Predictive Control)를 적용한 연구들에서는 지연을 보상하는 방법이 제시되었지만, 실시간으로 발생하는 지연을 효과적으로 처리하기에는 한계가 있었다[4]. 또한, 햅틱 피드백을 다룬 연구에서는 시간 지연이 사용자에게 전달되는 피드백의 질에 미치는 영향을 해결하기 위한 다양한 접근들이 존재했지만, 대부분은 지연 보상과 햅틱 품질 간의 균형을 찾는 데 어려움을 겪었다 [5].

본 연구에서는 네트워크 지연 환경에서 햅틱 피드백을 안정적으로 유지하며, 정밀한 원격 조작을 가능하게 하는 새로운 제어 시스템을 제안한다. 본 시스템은 에너지 기반 원격제어 알고리즘을 결합하여, 지연이 발생하더라도 사용자가 경험하는 피드백의 질을 유지하고 시스템의 안정성을 확보한다. 특히, 본 연구는 다양한 실험을 통해 300ms 이상의 지연 환경에서도 안정적인 제어 성능을 발휘할 수 있음을 입증하며, 원격 수술, 해저 작업, 고위험 작업 환경 등 정밀한 햅틱 상호작용이 필요한 분야에 실질적인 기여를 할 수 있음을 보여준다.

## II. 본론

## 2.1 양방향 원격제어 설계

양방향 원격제어(Bilateral Teleoperation)는 원격 환경에 위치한 로봇 시스템(Robot System)과 조작자가 위치한 마스터 장치(Haptic Device) 간의 실시간 상호작용을 가능하게 하는 제어 구조로, 물리적 접촉 및 힘 피드백을 포함한 정보를 교환할 수 있도록 설계된다(Fig. 1). 이 구조는 특히 햅틱 피드백이 중요한 정밀 작업에 널리 활용된다.

양방향 원격제어 시스템은 일반적으로 속도 - 힘(velocity-force)을 포함한다. 마스터 장치에서 생성된 위치 또는 속도 명령은 로봇 시스템으로 전달되어 해당 동작을 수행하게 되며, 그에 따른 접촉 힘이나 반력 정보는 다시 마스터로 전송되어 사용자가 원격 환경의 물리적 특성을 느낄 수 있도록 한다. 이때 양방향 통신 채널은 시간 지연(time delay) 및 패킷 손실(packet loss) 등의 통신 장애에 매우 취약하므로, 시스템의 안정성과 투명도(transparency)를 유지하기 위한 설계가 필수적이다.

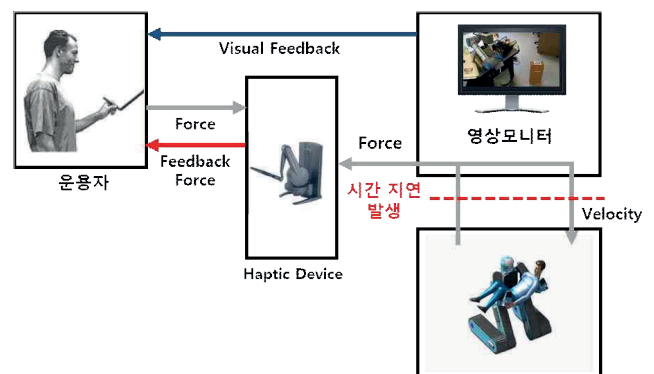


Fig. 1. Structure of bilateral teleoperation

## 2.2 에너지 기반 원격제어

에너지 기반 원격제어는 네트워크 지연, 패킷 손실 등으로 인해 발생할

수 있는 불안정성 문제를 해결하기 위한 원격 제어 기법이다. 시스템의 에너지 흐름을 시간 영역에서 실시간으로 모니터링하고, 필요할 경우 에너지를 흡수 및 제거를 통해 시스템의 패시브성, 즉 에너지를 생성하지 않도록 유지하는 기법이다.

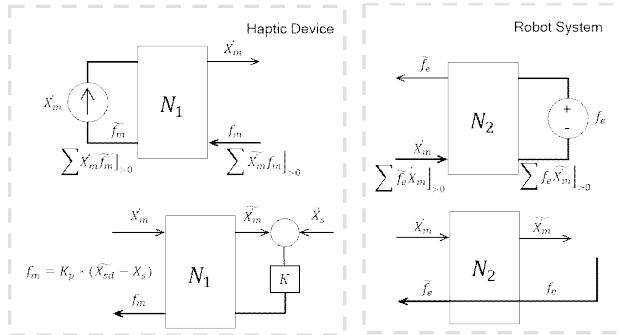


Fig. 2. Energy based teleoperation system

( $\dot{x}_m$  : 마스터 장치 속도,  $\tilde{x}_m$  : 지연이 발생한 마스터 장치 속도,  $f_m$  : 힘 피드백(마스터 장치),  $f_e$  : 힘 피드백(로봇 시스템),  $\tilde{f}_e$  : 지연된 힘 피드백(로봇 시스템),  $\dot{x}_s$  : 로봇 시스템 속도,  $x_{sd}$  : 로봇 시스템 이동 거리,  $N_1$  : 마스터 장치,  $N_2$  : 로봇 시스템)

에너지 기반 원격제어는 마스터 장치와 로봇 시스템에서 각 에너지 모니터링 시스템이 시스템 입출력 데이터(힘, 속도)를 기반으로 누적 에너지를 시간 영역에서 실시간으로 계산한다. 에너지 모니터링 시스템은 마스터 장치와 로봇 시스템에 각 하나씩 존재하며 입력되는 에너지는 각 네트워크 포트에서 계산하여 통신으로 송신한다. 각 장치(마스터 장치, 로봇 시스템)에서 수신받은 에너지와 생성되는 에너지를 비교하여 누적 에너지가 만약 0보다 작다면( $< 0$ ) 에너지를 제거하여 에너지를 억제한다. 에너지를 제거하는 값은 에너지 초과량에 따라 실시간으로 조정된다(Fig. 2). 이때 에너지가 초과되었을 시 수동성 제어기가 작동하여 마스터 장치에서는 초과된 에너지만큼 힘 피드백을 조정하고, 로봇 시스템에서는 에너지가 초과된 만큼 속도를 조정하여 안정성을 유지한다.

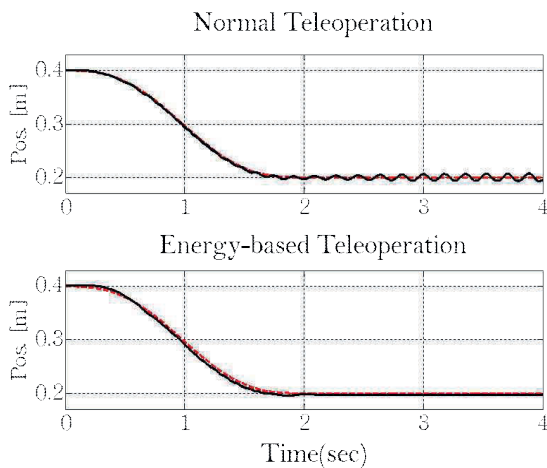


Fig. 3. Comparison of robot system end effector in normal vs. energy-based teleoperation with 100ms time delay

이는 각 시스템(마스터 장치, 로봇 시스템)에서 다른 시스템으로부터 공급된 에너지보다 더 많은 에너지를 출력하지 않도록하며 안정성을 유지시키게 된다..

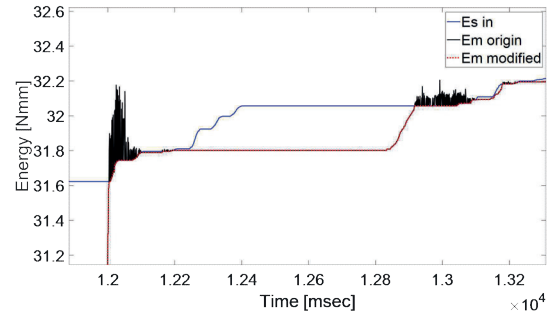


Fig. 3. Energy graph for master device

( $E_s$  in : 로봇 시스템에서 입력된 에너지,  $E_m$  origin : 마스터 장치에서 생성된 에너지,  $E_m$  modified : 초과된 에너지 만큼 조정된 마스터 장치에서 에너지)

### III. 결론

시간지연이 있는 상황에서 원격제어를 실시 했을 시 시스템에 따라 로봇 시스템 혹은 마스터 장치가 불안정할 수 있다. Fig. 3.에서 100ms 시간지연이 있을 때 기본적인 원격제어는 로봇 시스템의 끝단이 불안정해지는 것을 확인할 수 있다. 하지만 에너지 기반 원격제어는 누적에너지를 모니터링해 에너지 초과량을 제거해(Fig. 3.) 안정적으로 로봇의 끝단이 움직이는 것을 확인할 수 있다.

원격제어에서 100ms의 시간지연만으로도 불안정해지는 것을 확인했고, 에너지 기반 원격제어는 시간지연이 있을 때에도 로봇 시스템이 안정적으로 작동하는 것을 알 수 있다.

### 참 고 문 헌

- [1] G. Niemeyer and J.-J. E. Slotine, "Telemanipulation with time delays," The International Journal of Robotics Research, vol. 23, no. 9, pp. 873 - 890, 2004.
- [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] M. A. Hsieh, J. M. O'Donnell, and P. K. Khosla, "Human teleoperation of a robot with time delay: issues and solutions," IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 12, no. 4, pp. 518 - 522, 1996.
- [4] J. A. Lee, S. K. Lee, and W. K. Chung, "Predictive control of teleoperation systems with communication delays," IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol. 18, no. 3, pp. 616 - 625, 2010.
- [5] H. T. Chien and C. L. Lin, "Haptic feedback control for teleoperation with time delays," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 55, no. 6, pp. 2220 - 2230, 2008.