

# Passive 양방향 원격조작 시스템의 구현

## Implementation of passive bilateral teleoperation system

유성구, 김영철, 정길도, 이영춘

Yoo sung goo, Kim young chul, Kil to chong, Lee young choon

**Abstract** - Master and slave of teleoperation control system through internet or long distance cable must keep stable. If one part becomes unstable or time delay happens in network, the all system can become unstable. Usually, stability of teleoperation control system can distinguish by passivity. In this paper, we implemented bilateral teleoperation control system that load passivity controller to keep stability of system. Composed by manipulator that trillion this sticks and horizontal manufacturing that have force reflecting function are available and embodied so that control through wireless LAN may be available. And distinguished stability through an experiment and manufacturing performance.

**Key Words** : teleoperation, time delay, passive, force-reflect, network control

### 1. Introduction

인간 제어와 자동 운영 기계로 연결된 마스터-슬레이브 원격조작 시스템이 최근 활발히 연구되고 있다. 또한 제어이론, 인지과학, 기계설계, 컴퓨터과학 등 최신 분야로의 결합이 연구되고 있다. 원격조작의 응용으로는 네트워크 로봇, 원격수술, 우주 또는 심해의 원격 매니플레이터 제어가 있다. 그러나 현재 대부분의 원격제어 시스템은 실시간 피드백을 제공하지 않고 사용자가 슬레이브의 조작 프로그램을 작성하여 전송하면 로컬제어기가 이를 실행하는 형태로 되어있다. 또한 원격 조작 시 사용자에게 접촉 힘과 같은 슬레이브 주변 환경정보를 사용자에게 전달한다면 시스템의 수행 능력을 향상시킬 수 있다.

통신채널에서 네트워크 혼잡시 발생하는 시간지연은 대역폭과 거리에 따라 발생한다. 최근에 안정성 분석과 제어 시스템 설계측면에서 좋은 결과를 보여주는 몇몇 연구결과가 발표되었다. 이는 힘반향을 통해 양방향 원격제어 시스템의 시간지연 효과를 보상하는 방법이다. 선형 회로이론에 기반을 둔 제어 파라미터를 이용한 이론적 설계 방법[1] 또는 선형 강인제어이론[2] 연구가 진행되었다. Leung, Francis 그리고 Apkarian은 시간지연을 가지는 원격조작 시스템을 위한  $\mu$ -synthesis 기반 양방향 제어기를 발표하였다[3]. S. Lee와 H.S. Lee는 최적 제어 시스템[4]을 제안하였고 Munir와 Book은 예측시스템을 제안하였다[5]. 최근에는 매니플레이터와 주변 환경사이에서 발생하는 상호에너지에 관점을 둔 수

동성 제어이론이 활발히 연구되고 있다.

수동성 제어에 대한 연구로 Anderson과 Spong이 1989년 제안한 일정한 지연에 대해 발생하는 불안정한 상태를 스퀈터링(scattering) 이론을 이용하여 제거하는 방법이다[6]. 또 다른 연구로는 Neimeyer와 Slotine이 발표한 2-포트 시스템을 위한 동등 웨이브 변수 공식이 있다[7][8]. 그러나 위의 연구는 일정한 지연시간에 대한 연구로서 시간지연이 변할 경우에는 수동성을 보장할 수 없다. 이는 제어기와 매니플레이터 사이에 에너지 불안정이 발생하여 시스템이 불안정해질 수 있다. Lozano와 Spong은 에너지 흐름을 보상하기 위한 계인을 탑재하여 시변 시간지연을 처리할 수 있는 연구를 제안하였다[9]. 그러나 계인은 시변 시간지연의 미분과 연계되어 있어서 시간지연의 변화를 예측해야하는 어려움이 있다. Hou와 Luecke는 수동성 기반 시스템모니터링 시스템을 제안하였다[10]. 이 시스템은 시스템이 수동성을 잃어버리면 수동성 조절기를 사용하여 원상태로 되돌리도록 설계되었다. Hirche와 M.buss는 강인한 수동성을 얻기 위해 임피던스 매칭 필터를 사용하였다.

본 논문에서는 양방향 제어에서의 수동성 분석법에 대해 연구하였고, 이를 구현하였다. 특히 시변 시간지연을 가지는 네트워크 채널에서 시스템의 안정성과 위치추적성능에 중점을 두었다. 힘반향 시스템의 구현이 가능한 조이스틱과 원격지에서 마스터의 위치를 추적하는 슬레이브 시스템을 구성하여 실험을 진행하였다. 또한 무선랜을 통해 시변 시간지연을 가지는 원격시스템을 구성하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 1장에서는 연구목표와 방법을 소개하였고, 2장에서는 수동성 제어이론에 대하여 설명하였다. 3장에서는 수동성 시스템 구성을 보이며 4장에서는 시뮬레이션 및 실험 결과를 설명하겠다. 마지막으로 5장에서는 본 논문의 결론을 기술하였다.

#### 저자 소개

- \* 유성구 : 全北大學 電子情報學科 博士課程
- \*\* 김영철 : 群山大學 機械工學科 副教授 · 工博
- \*\*\* 정길도 : 全北大學 電子情報學科 教授 · 工博
- \*\*\*\* 이영춘 : 군산산단 클러스터 추진단

## 2. 수동성 제어기

원격제어는 원격지 환경으로 인간의 감각을 확장시킨 것이라고 할 수 있다. 그림 1은 마스터와 슬레이브로 연결된 2 포트 통신 시스템을 보여준다. 원격조작자가 마스터로 명령을 내리면 슬레이브는 이를 추종하게 된다. 마스터의 속도를 슬레이브로 전송한 후 주변 접촉에 의한 힘반향을 마스터로 다시 전송하는 형태이다.

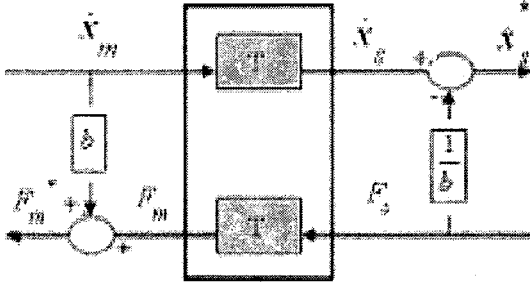


그림 1. 2 포트 힘반향 통신 시스템

Fig 1. communication system of 2 port force reflection

수동성 기반 양방향 제어는 일정시간동안 시스템에 제공된 에너지의 관찰에 중점을 두는 시스템이다. 또한 에너지를 측정하여 시스템의 안정을 판별 할 수 있다. 수동성 공식은 회로에서는 전력 즉 에너지의 물리적 개념을 통해 수학적으로 표현할 수 있다. 즉

$$P = x^T y = \frac{dE}{dt} + P_{diss} \quad (1)$$

와 같이 표현한다. 여기서  $P$ 는 시스템에 입력된 전체 에너지이고  $x$ 는 입력 벡터,  $y$ 는 출력 벡터이다. 또한 벡터  $x$ 와  $y$ 의 스칼라 곱이  $P$ 이다. 총에너지  $E$ 는 초기 저장된 에너지에 기반한 입력 에너지이며,  $P_{diss}$ 는 에너지 손실을 의미한다. 만약 시스템이 항상 수동적이면 다음과 같은 공식을 만족한다.

$$\int_0^t P dt = \int_0^t x^T y dt = \quad (2)$$

$$E(t) - E(0) + \int_0^t P_{diss} dt \geq -E(0) = \text{CONSTANT}$$

식 (2)에서 시스템에 전달된 전체 에너지는 초기 저장된 에너지에 따라 제한된다. 시스템이 수동성을 유지하기 위해서는 에너지의 손실이 0이거나 양의 값을 가져야 한다. 또는 저장된 에너지가 하계에 도달하지 않으면 즉 시스템 자체에서 에너지를 생성하지 않으면 수동성을 유지한다. Lyapunov 함수에 따르면 외부 입력이 없으면 수동성 시스템이 안정하고 시스템이 에너지를 생성하게 되면 시스템을 불안정하게 만든다. 네트워크 시스템에 저장된 에너지는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$E_{stoc} = \int_0^t P dt = \int_0^t x^T y dt = \int_0^t (\dot{x}_m F_m - \dot{x}_s F_s) dt \quad (3)$$

여기서  $\dot{x}_m$ 과  $\dot{x}_s$ 는 마스터와 슬레이브의 속도이며  $F_m$ 과  $F_s$ 는 마스터와 슬레이브에 가해진 힘이다. 위에 언급한 것처럼

수동성을 항상 유지하기 위해서는  $E_{stoc}$  즉 에너지의 손실이 항상 양의 값을 가져야 한다.

## 3. 시스템 구성

양방향 원격제어 시스템을 구현하기 위해 힘반향 구현이 가능한 조이스틱과 수평방향으로 동작이 가능한 매니플레이터를 사용하였다. 그림 2와 3은 조이스틱과 매니플레이터를 보여준다. 시간 지연 발생을 위해 무선랜을 사용하여 서로 연결하였으며 매니플레이터 제어를 위해 마이크로프로세서를 사용하여 모터제어를 하였다.

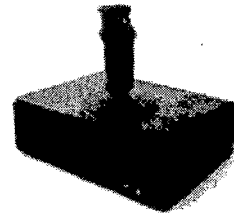


그림 2. 힘반향 조이스틱

Fig 2. Force reflecting joystick

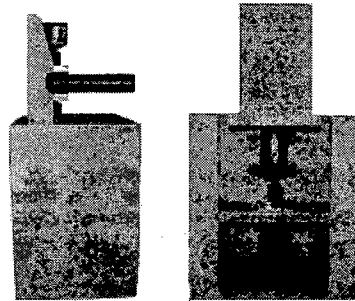


그림 3. 수평 조작 매니플레이터

Fig 3. control manipulator

그림 4는 전체 시스템의 구성도를 보여준다. 마스터(조이스틱)와 슬레이브(매니플레이터)에 각각 2장에서 언급한 수동성 제어를 탑재하였다. 또한 위치와 속도제어가 가능하도록 설계되었으며 최대속도는 0.2m/s 이며 최대토크는 10Nm 이다.

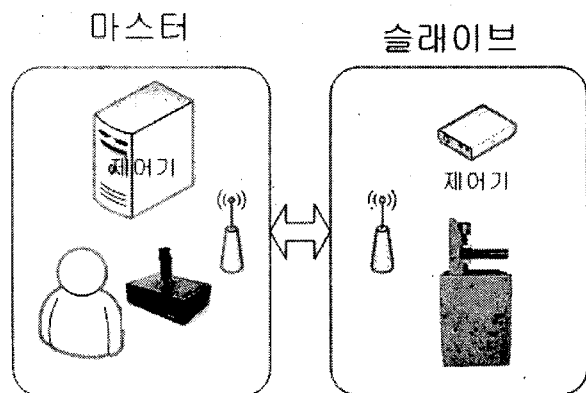


그림 4. 양방향 원격제어 시스템

Fig 4. Bilateral teleoperation system

매니플레이터는 토크센서를 통해 힘반향 값을 측정하도록 되어 있으며 포텐서미터를 통해 위치를 측정한다. 측정된 힘은 수동성 제어기를 통해 소멸 시킨 후 그 소멸 값을 마스터로 전송하여 사용자가 그 힘을 느낄 수 있도록 설계되었다.

#### 4. 시뮬레이션 및 실험 결과

속도 및 위치 제어를 원격조작하는 시뮬레이션 프로그램을 구성하였다. Matlab을 사용하여 시간지연 효과를 적용한 속도 제어 시뮬레이션이 그림 5에 나타난다. 진한선이 마스터의 속도를 나타내면 녹색선이 슬레이브의 속도를 나타낸다. 약 100ms의 시간을 가지는 시스템이며 시뮬레이션 결과 잘 추종하는 것을 볼 수 있다.

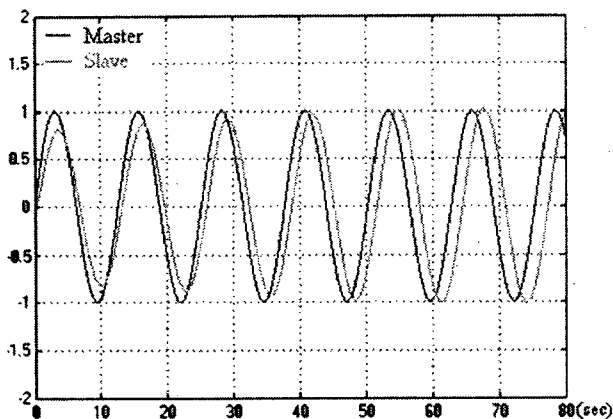


그림 5. 속도 제어 시뮬레이션  
Fig 5. simulation result of velocity control

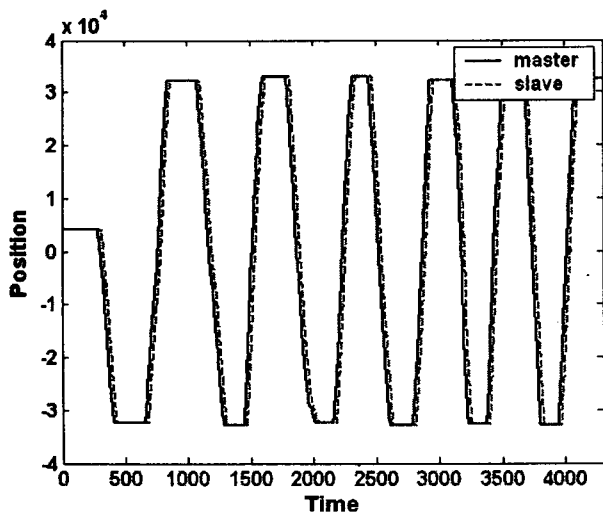


그림 6. 위치 추적 제어  
Fig 6. tracking of position

그림 6은 실제 구현한 시스템을 통해 위치 추적 결과를 보여준다. 시간지연은 약 25ms인 시스템을 사용하였다. 마스터의 위치를 따라 슬레이브가 이를 잘 추종함을 볼 수 있다. 무선랜을 사용하였기 때문에 시간지연에 따라 불안정해질 수 있지만 수동성 제어기에 의해 시스템이 안정하게 동작함을

볼 수 있다.

#### 5. 결론

본 논문에서는 원격지에 있는 로봇이나 매니플레이터를 제어할 시 시간지연 및 불안정요소를 해결하여 사용자가 쉽게 조작할 수 있는 시스템을 구성하였다. 수동성제어기를 탑재하여 안정성을 유지하였으며 토크센서를 사용하여 힘반향 시스템을 구현하였다. 또한 무선랜을 사용하여 시간지연 효과를 보였으며 실험을 통해 시스템의 성능을 측정하였다. 향후 연구로는 예측 시스템을 도입하여 더욱 정교한 제어 시스템을 구현하며 다양한 실험 및 알고리즘을 탑재한 제어시스템을 연구하고자 한다.

#### 참 고 문 헌

- [1] R. J. Adams and B. Hannaford, "Stable Haptic Interaction with Virtual Environments," *IEEE Trans. on Robot. Automat.*, vol. 15, no. 3, pp. 465-474, 1999.
- [2] J. E. Colgate, "Robust Impedance Shaping Telemanipulation," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, Vol. 9, No. 4, pp. 374-384, 1993.
- [3] Leung, G. M. H., Francis, B. A., and Apkarian, J. 1995. Bilateral controller for teleoperators with time delay via  $\mu$ -synthesis. *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 11(1): 105-116.
- [4] S. Lee and H. S. Lee, "Design of optimal time delayed teleoperator control system," in *Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Automat.*, San Diego, CA, 1994, pp. 3252-3257.
- [5] Munir, S., and Book, W. J. 2002. Internet-based teleoperation using wave variables with prediction. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* 7(2): 124-133.
- [6] R. J. Anderson and M. W. Spong, "Asymptotic stability for force reflecting teleoperations with time delay," presented at the *IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, Acottdale, AZ, 1989
- [7] Niemeyer, G., and Slotine, J.J.E., "Stable Adaptive Teleoperation," *I.E.E.E. J. of Oceanic Engineering*, 16(1), 1991.
- [8] Niemeyer, G., and Slotine J.J.E., "Telemanipulation with Time Delays," *International Journal of Robotics Research*, 23(9), 2004.
- [9] Lozano, R., Chopra, N., and Spong, MW, "Passivation of Force Reflecting Bilateral Teleoperators with Time Varying Delay," *Mechatronics'02*, Enschede, Netherlands, June 24-26, 2002. 94.
- [10] Y. Hou and G. R. Luecke, "Passivity control of teleoperation systems with time delay," presented at *The 10th IASTED International Conference on Robotics and Applications (RA2004)*, Honolulu, Hawaii, 2004.