에너지 제한 알고리즘을 이용한 시변 지연과 데이터 손실을 갖는 양방향 원격 조작 시스템의 안정화 제어

서창훈*, 김재하**, 김종필**, 류제하***

Stable Bilateral Teleoperaion using the Energy-Bounding Algorithm under Time-varying Delay and Data Loss

요 약

본 논문은 시간 지연 및 데이터 손실이 존재하는 양방향 원격 조작 시스템의 안정성을 확보하기 위해 에너지 제한 알고리즘을 적용한다. 다양한 실험 결과, 자유 공간 실험에서는 단방향 2.5 초까지의 시변 시간 지연(variable time delay), 벽 접촉 실험에서는 단방향 0.3 초까지의 시변 시간 지연에 대해 전체 시스템이 안정적으로 거동하는 것을 확인하였다. 또한 데이터 손실 발생 시 이전 데이터를 유지하는 방법을 이용하여 에너지 제한 알고리즘을 적용하면 90%까지의 데이터 손실이 발생할 경우에도 시스템의 안정성을 보장할 수 있음을 확인하였다.

*주저자 : 광주과학기술원 기전공학과 박사 과정; e-mail: search@gist.ac.kr
**공동저자 : 광주과학기술원 기전공학과 박사 과정; e-mail: kjh81@gist.ac.kr
**공동저자 : 한국과학기술연구원 박사; e-mail: lowtar74@imrc.kist.re.kr
***교신저자 : 광주과학기술원 기전공학과 교수; e-mail: ryu@gist.ac.kr

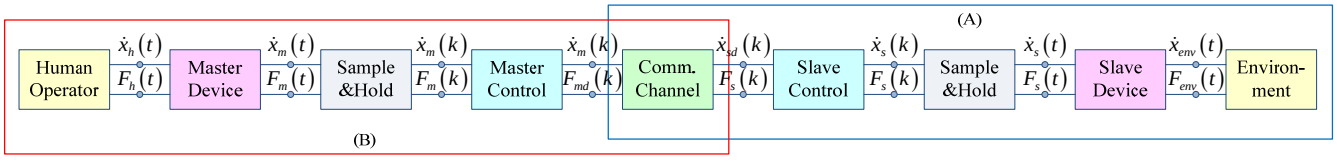
1. 서론

원격 조작(teleoperation)은 심해, 우주공간, 원자력 발전소, 군사 목적용 등 사람이 직접 작업하기 어렵거나 위험한 환경에서 사람을 대신한 로봇을 이용하여 작업을 수행하는 것을 말한다. 양방향 원격 조작의 경우 마스터의 위치 또는 속도 정보가 슬레이브측으로 전송이 되고 슬레이브측에서는 힘 정보가 통신 채널을 통하여 마스터측으로 전송이 되는데 이때 통신 채널에서 발생하는 시간 지연이 원격 조작 시스템의 안정성에 영향을 미치게 된다.

본 논문에서는 햅틱 상호 작용에서의 안정성을 보장하기 위하여 제안한 에너지 제한 알고리즘(Energy-Bounding Algorithm)[1]을 시간 지연 및 데이터 손실이 존재하는 양방향 원격 조작 시스템에 적용하여 시스템의 안정성을 확보할 수 있음을 나타낸다.

2. 에너지 제한 알고리즘을 이용한 양방향 원격 조작

원격 조작 시스템은 그림 1 과 같이 조작자, 마스



[그림 1] 에너지 제한 알고리즘을 이용한 양방향 원격 조작 제어

터 매니퓰레이터, 통신채널, 슬레이브 로봇, 작업 환경으로 구성된다. 마스터측을 기준으로 볼 때 그림 1의 박스 (A)를 햅틱 시스템에서의 가상 환경으로 간주하면 에너지 제한 알고리즘을 바로 적용할 수 있다. 같은 방법으로 슬레이브측을 기준으로 할 경우 박스 (B)를 가상 환경으로 고려하여 에너지 제한 알고리즘을 아래와 같이 마스터 및 슬레이브측에 각각 적용한다.

i) 마스터측,

$$F_{mEBA}(n) = F_{mEBA}(n-1) + \beta(n)\Delta x_m(n) \quad (1)$$

여기서,

$$\beta(n) = \frac{F_m(n) - F_{mEBA}(n-1)}{\Delta x_m(n)}, \quad \Delta x_m(n) = x_m(n) - x_m(n-1). \quad (2)$$

ii) 슬레이브측,

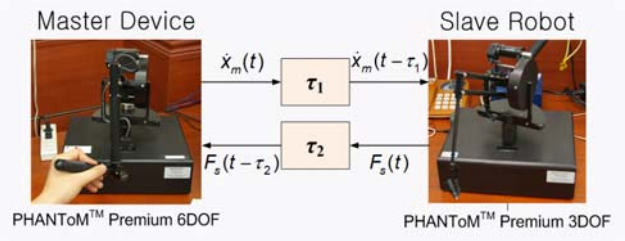
$$F_{sEBA}(n) = F_{sEBA}(n-1) + \beta(n)\Delta e_s(n) \quad (3)$$

여기서,

$$\beta(n) = \frac{F_s(n) - F_{sEBA}(n-1)}{\Delta e_s(n)}, \quad \Delta e_s(n) = e_s(n) - e_s(n-1), \quad e_s(n) = x_{sd}(n) - x_s(n). \quad (4)$$

3. 실험결과

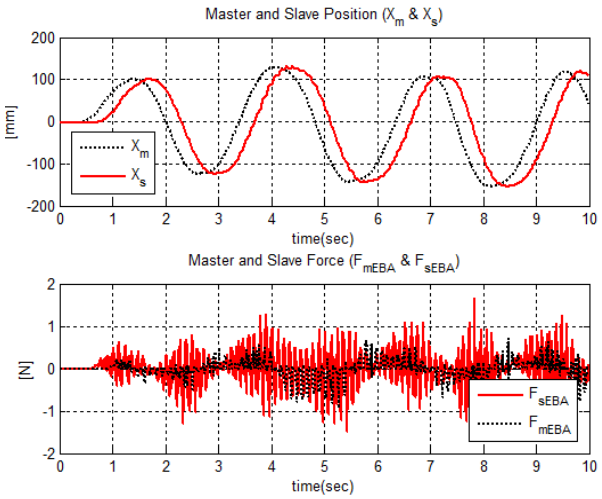
에너지 제한 알고리즘을 양방향 원격 조작에 적용하는 것에 대한 타당성을 검증하기 위하여 그림 2 와 같이 두 대의 PHANToM [2]을 각각 마스터와 슬레이브 장치로 사용하여 실험을 수행하였다.



[그림 2] 양방향 원격 제어 실험 환경

그림 2 와 같이 마스터의 위치 정보가 통신 채널을 거쳐 τ_1의 시간 지연을 가지고 슬레이브측으로 전송이 되고 슬레이브의 힘 정보가 τ_2의 시간 지연을 가지고 마스터 측으로 전송이 된다.

에너지 제한 알고리즘을 적용하였을 경우, 그림 4 와 같이 단방향 300 msec 의 시변하는 시간 지연과 30%의 데이터 손실이 발생하더라도 슬레이브가 마스터를 잘 추종함을 확인할 수 있다. 다양한 실험 결과, 단방향 2.5 초까지의 시변 시간 지연(variable time delay), 벽 접촉 실험에서는 단방향 0.3 초까지의 시변 시간 지연에 대해 전체 시스템이 안정적으로 거동하는 것을 확인하였다. 또한 데이터 손실 발생 시 이전 데이터를 유지하는 방법을 이용하여 에너지 제한 알고리즘을 적용하면 90%까지의 데이터 손실이 발생할 경우에도 약간의 진동이 발생하지만 시스템의 안정성은 보장할 수 있음을 확인하였다.



[그림 3] $\tau_1 = \tau_2 = 300$ msec (시변 시간 지연) 및 30% 데이터 손실이 있을 때 에너지 제한 알고리즘을 적용한 자유 공간 실험의 위치/힘 응답

4.결 론

자유 공간 실험 및 벽 접촉 실험 등을 통해 시간 지연 및 데이터 손실이 있는 양방향 원격 조작에서 에너지 제한 알고리즘을 적용하여 시스템의 안정성을 보장할 수 있음을 확인하였다.

감사의 글

본 논문은 2008 년도 지식경제부 및 정보통신연구진흥원의 대학 IT 연구센터 육성·지원사업의 연구로 수행되었습니다. (IITA-2008-C1090-0804-0002).

참고문헌

[1] Jong-Phil Kim, "Energy Bounding Control and LOMI-based Rendering for Haptic Interaction with Virtual Environments," Ph. D. dissertaion, Gwangju Institute of Science and Technology, Gwangju, Korea, 2007.

[2] http://www.sensable.com/