속도 모드 양방향 원격 제어의 안정화 에너지 제한 방법의 실험 결과

Experimental Results on the Energy-bounding Approach to Robustly Stable Rate-mode Bilateral Teleoperation Systems

박 성 준, 서 창 훈, 류 제 하*
(Sungjun Park¹, Changhoon Seo¹, and Jeha Ryu¹)

¹Gwangju Institute of Science and Technology

Abstract: This paper presents experimental results on the energy-bounding approach to a rate-mode bilateral teleoperation control that can guarantee the robust system stability in variable time-delayed telecommunication environments. Previously, rate-mode energy bounding approach [15] was proposed and verified with experimental results using the simulated remote slave model. In this paper, a real experimental setup using an industrial robot (Denso) as a remote slave robot composed and conducted similar experiments with previous paper. In order to guarantee stability of the Denso when contacting with high impedance wall, velocity based impedance control modified by position based is used. Experimental results show that the rate-mode energy bounding approach can guarantee stable bilateral teleoperation system in the free and contact motion with variable time delay.

Keywords: energy-bounding algorithm, teleoperation, rate-mode, force feedback

I. 서론

원격 조작은 조작자가 마스터 장비를 이용하여 원격지에 있는 로봇을 조작하는 것이다. 이것은 심해, 우주, 원자력 발전소와 같이 사람이 갈 수 없거나 위험한 장소에서 로봇을 이용한 다양한 작업을 할 수 있게 해준다. 최근 무인화된 로봇을 이용하여 행성 탐사 및 군사지역 탐사, 지뢰와 같은 위험요소 제거 등의 목적으로 원격 조작에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. [1]과 [2]에 원격 조작 제어에 주요 과제들이 잘 설명 되어 있다.

원격 조작에 있어서 위치 제어 방법과 속도 제어 방법이 있다. 일반적으로 사용되는 위치 제어 방법은 마스터 장비의 위치를 슬레이브 장비가 그대로 혹은 비례적으로 따라가는 것으로 높은 정확도를 요구하는 작업에 많이 쓰인다. 또한 속도 제어 방법은 마스터 장비의 위치가 슬레이브 로봇의 속도로 전송되는 방법으로 차량 운행과 같이 슬레이브의 작업 영역의 제한이 없는 시스템에서 주로 사용된다[3,4].

원격 조작 시스템에서 실감도를 향상 시키고 작업 효율을 높이기 위해 힘 반향을 하게 된다. 속도 모드 원격 조작에서도 다양한 힘 반향 방법이 적용되고 있다. [5]와 [6]에서는 슬레이브 로봇에 위험을 주는 장애물 정보를 제공하기 위해 장애물과의 거리에 반비례한 힘을 제공함으로써 힘 반향 방법의 효율성을 검증하였다. 또한 [7]과 [8]에서는 슬레이브 로봇의 자유 공간 운행 중에는 조작자가 원하는 속도와 슬레이브 로봇의 실제 속도의 차이에 비례한 힘을 조작자에게 반향을 해주었고 장애물과 접촉할 때는 Force 센서를 이용해 측정된

외력을 조작자에게 반향 해주었다. 속도차이에 의한 힘 반향 방법은 조작자에게 속도감을 제공함으로써 슬레이브 로봇을 안전하게 부드럽게 조작 할 수 있다. [9]에서는 무인 차량 원격 조종을 할 때 현장감을 향상시키기 위해 현실적인 조향 느낌을 제공하였다.

양방향 원격 조작에서 통신 채널에 의한 시간 지연 및 강성이 큰 물체와의 접촉은 시스템의 불안정성을 증가시키고 투명성을 떨어트리기 때문에 안정성과 투명성 확보가 중요한 쟁점이 된다. 속도 모드 양방향 원격 조작에서 시스템의 안정성을 보장하기 위해 다양한 연구들이 진행되었다. [10]와 [11]는 [12]에서 제안된 위치 제어 안정화 제어 기법인 4 channel architecture를 속도 모드로 확장 적용 하였다. 환경 단에서 오는 힘 정보의 미분값을 조작자에게 제공하였고 100ms의 고정된 시간지연에서 안정성을 보장하고 투명성을 높이하고자 하였다. 하지만 이 방법은 슬레이브 로봇과 환경 등 전체 시스템의 동특성(dynamics)을 알아야 하고 선형 시스템에만 적용 가능하다. [7]과 [8]에서는 수동성 이론에 근거한 bilateral framework를 제안하여 1.4s의 시간지연이 발생하는 환경에서 안정성을 보장하였다. 또한 [13]에서는 [14]에서 제안된 햅틱 상호 작용 시스템에서 수동성 이론에 근거한 time domain passivity algorithm을 속도 모드로 확장하였다. 하지만 이 연구는 시간 지연이 고려되지 않았다. [15]에서는 [16]에서 제안된 수동성 이론에 근거한 햅틱 상호 작용 시스템 안정화 알고리즘인 에너지 제한 알고리즘(energy-bounding algorithm, EBA)을 속도 모드 양방향 원격 조작 시스템에 확장 적용할 수 있음을 보였는데 슬레이브 로봇을 시뮬레이션 모델로 사용하여 200ms의 가변적인 시간 지연이 발생하는 환경에서 안정성을 보장하였다.

본 논문은 [15]에서 제안된 속도 모드 에너지 제한 알고리즘을 시뮬레이션 슬레이브 모델이 아닌 실제 산업용 로봇

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2011. 2. 20., 수정: 2011. 3. 10., 채택확정: 2011. 3. 29.

박성준, 서창훈, 류제하: 광주과학기술원 기전공학과

(psj@gist.ac.kr/search@gist.ac.kr/ryu@gist.ac.kr)

※ 이 논문은 방위사업청과 국방과학연구소의 지원으로 수행되었음
(계약번호 UD100004ID).

(Denso)을 슬레이브 로봇으로 이용하여 실험함으로써 기존의 강건함을 검증 하였다. 일반적으로 힘 반향 시스템에서 샘플링 속도는 빠르면 빠를수록 좋은 성능을 발휘하는데 실험에 사용된 슬레이브 로봇은 느린 샘플링 속도(50Hz)를 갖고 있고 이로 인해 [15]의 실험 환경보다 열악한 환경 속에서 실험이 수행되었다. 가변적인 시간지연이 발생하는 통신 환경을 구성하기 위해 통신용 에뮬레이터를 사용하였고 1자유도 마스터 장비와 슬레이브를 이용하여 속도 제어 양방향 원격 조작 시스템 에너지 제한 알고리즘의 효과를 보였다.

본 논문의 II 장에서는 속도 모드 양방향 원격 조작의 시스템 구성에 대해 설명하였고 III 장에서는 속도 모드 에너지 제한 알고리즘을 요약 하였다. 또한 IV 장에서는 실험 결과를 보였고 V 장에서 결론을 정리하였다.

II. 속도 모드 양방향 원격 조작

1. 시스템 구성

속도 모드 양방향 원격 조작은 그림 1과 같이 조작자, 힘 반향 장비, 제어기, 통신 채널, 슬레이브 로봇으로 구성되어 있다. 여기서, x_h , x_d 와 v_d 는 각각 조작자의 위치, 힘 반향 장비의 위치, 조작자가 원하는 슬레이브의 속도를 나타낸다; F_h , F_e 와 F_d 는 각각 조작자가 가하는 힘과 슬레이브의 상황에 따라 조작자에게 제공되는 힘, 제어기를 통해 실제 조작자에게 제공되는 힘을 나타낸다; τ_1 과 τ_2 는 각각 통신 채널에서 발생하는 가변적인 시간지연을 나타낸다; α 는 힘 반향 장비의 위치 정보와 조작자가 원하는 슬레이브의 속도 정보 비례 이득이고 v_a 는 슬레이브의 실제 속도로써 조작자에게 힘 반향을 하기 위해 마스터 단으로 전송된다; r_d 는 $x_d - x_a$ 고 x_a 는 v_d 가 힘 반향 장치에 대응(mapping)되는 위치이다.

조작자는 힘 반향 장비의 위치(x_d)를 조작하고 이때 힘 반향 장비의 위치 정보는 슬레이브의 속도 정보($v_d = \alpha \cdot x_d$)로 변환되어 통신 채널을 통해 슬레이브에 전송된다. 슬레이브는 마스터 단에서 전송된 속도 정보를 이용하여 구동되는데 슬레이브의 실제 속도(v_a) 슬레이브의 동적 특성 및 외부 환경(경사로, 노면 마찰)으로 인해 조작자가 원하는 속도를 그대로 따라가지 못한다. 특히, 슬레이브가 장애물과 충돌 할 경우 슬레이브는 정지($v_a = 0$)하기 때문에 조작자의 원하는 속도와 더욱 큰 차이를 보이게 된다. 이렇게 슬레이브의 실제 속도에 영향을 미치는 요소들에 대한 정보를 힘 반향을 통해

조작자에게 제공하기 위해 슬레이브의 실제 속도를 마스터 단에 전송하고 이를 이용하여 힘 반향을 하게 된다.

2. 힘 반향 방법

속도 모드 양방향 원격 조작 시스템에서 슬레이브 로봇 주변의 환경 정보를 힘 반향으로 제공하기 위해 다양한 힘 반향 방법을 쓰인다. 이에 [17]에서 3가지 힘 반향 방법에 대한 효율성을 비교하였고 시간지연이 발생하는 마스터 단에서 계산된 속도 차이를 이용한 힘 반향 방법이 효과적임을 보였다. 본 연구에서도 이 방법을 사용하였고 반향 된 힘은 수식 (1)과 같다.

$$F_e(k) = K_s(v_d(k) - v_a(k - \tau_2)) \quad (1)$$

여기서 K_s 는 민감도로써 속도 차이에 대한 조작자에게 제공되는 힘을 민감하게 제공하고 싶을 때 높은 K_s 를 사용할 수 있다. 그런데 K_s 는 시스템 이득이기 때문에 높은 값을 사용할 경우 시스템의 불안정성을 초래할 수 있다. 이러한 불안정성 문제는 속도 모드 양방향 원격 조작 에너지 제한 알고리즘을 통해 해결 할 수 있다. 또한 이러한 힘 반향 방법은 차량 운전시 가속 페달 시스템과 유사함을 갖고 있다. 가속 페달을 밟음으로 조작자가 원하는 속도를 차량에 제공하지만 차량 주변 환경 요소로 인해 차량의 실제 속도가 원하는 속도를 따라가지 못하게 되고 이러한 차이로 인한 가속도를 몸으로 느끼게 된다. 수식 (1)에 의한 힘 반향 방법도 이러한 차이를 조작자에게 제공하므로 가속과 감속에 대한 정보를 제공하게 되고 속도감을 줄 수 있다. 특히 장애물 충돌과 같은 슬레이브 로봇에 위험을 줄 수 있는 외력이 작용할 경우 속도 변화가 커져서 조작자가 외력에 대한 정보를 충분히 느낄 수 있게 된다. 이 논문의 IV 장에서는 자유 공간 운행에서의 속도감과 장애물 충돌에 대한 정보를 제공하는 실험을 하였고 시간 지연으로 발생하는 불안정성을 보장하고자 에너지 제한 알고리즘을 적용 하였다.

조작자에게 제공되는 힘의 방향은 조작자의 의도와 반대 방향으로 제공된다. 즉, 조작자가 가속을 위해 힘 반향 장비를 전진하는 방향으로 움직일 경우 후진하는 방향으로 힘을 제공함으로써 슬레이브의 속도가 즉시 따라가지 못하고 있다는 정보를 제공할 수 있다. 반대의 경우에는 반대방향으로 힘을 제공하게 된다.

그림 1. 속도 모드 양방향 원격 조작 시스템.

Fig. 1. Rate-mode Bilateral teleoperation system with EBA.

3. 슬레이브 로봇

슬레이브 로봇은 6자유도 위치 제어 기반의 산업용 로봇 (Denso)을 사용하였다. 내부의 위치 제어기는 그림 2의 블록 (A)와 같다. 이 위치 제어기와 로봇의 동특성은 공개되어있지 않기 때문에 그림 2의 블록 (A)를 위치 입력을 받고 위치 출력을 하는 블랙 박스와 같이 볼 수 있다. 또한, 슬레이브 로봇에는 ATI社의 Force/Torque 센서 (Mini45)를 부착하여 외부 환경의 힘과 토크를 측정하였다.

일반적으로 산업용 로봇은 높은 기어 비로 인해 역 구동이 되지 않기 때문에 장애물과 충돌 후에 뒤로 밀리지 않는 경향이 있다. 실제로 슬레이브 로봇이 장애물과 충돌 후 로봇 지지대가 뒤로 밀리거나 로봇의 과부하로 인해 모터가 꺼지는 현상이 발생하였다. 이로 인해 슬레이브 로봇의 실제 속도가 변하지 않게 되어 수식 (1)에 의한 힘 반향이 되지 않는다. 그러므로 외력에 반응하는 슬레이브 로봇을 만들기 위해 위치 기반 임피던스 제어(position based impedance control) [18]을 속도 모드에 맞게 수정하여 이용하였다. 임피던스 제어는 로봇이 갖는 동특성을 사용자가 원하는 동특성으로 만들어주는 제어 기법으로 Force 센서로 측정된 외력이 로봇에 작용할 경우 제어기가 로봇의 움직임을 제어하게 된다. 그림 2는 기존의 임피던스 제어 기법을 속도 모드에 맞게 마스터 단에서 전송된 속도 정보를 적분하여 슬레이브의 위치 정보로 제공하였다. 목표 임피던스 (target impedance)는 수식 (2)와 같이 힘과 속도에 관련된 일차 시스템이다.

$$H(s) = \frac{v_f(s)}{F(s)} = \frac{1}{ms + b} \quad (2)$$

여기서 m 과 b 는 사용자가 원하는 로봇의 질량과 댐핑으로 슬레이브 로봇이 환경단과 접촉할 때 빠른 반응 속도를 갖고 또한 불안정성을 줄이는 방향으로 m 과 b 값에 대한 설계가 필요하다. 슬레이브가 로봇이 환경에서 오는 힘에 대한 관성을 크게 하기 위해 m 값을 높이고 에너지 소모를 위해 b 값을 높이는 것이 로봇의 안정화를 위해 중요하지만 너무 큰 값을 사용할 경우 로봇의 반응이 너무 느려지는 단점이 있기 때문에 적절한 설계가 필요하다. 본 논문에서는 [14]에서 사용된 시뮬레이션 모델과 비슷한 동적 특성을 갖는 실제 슬레이브 로봇을 구성하기 위해 m 과 b 값을 다음과 같이 정하였다.

$$m = 20\text{kg}, \quad b = 1000\text{Ns/m}$$

그림 2. 슬레이브 로봇의 포지션 기반 임피던스 제어.

Fig. 2. Position-based impedance control of slave robot.

III. 속도 모드 양방향 원격 조작 에너지 제한 알고리즘

이 장에서는 [15]에서 제안된 속도 모드 양방향 원격 조작 에너지 제한 알고리즘을 간략히 소개한다. 햅틱 상호 작용 시스템에서 조작자는 힘 반향 장비를 이용하여 가상의 물체와 접촉을 하게 되는 수식 (3)과 같이 힘 반향 장비의 위치 (x_d)가 가상 물체를 관통한 거리에 비례한 힘(F_w)을 제공 받게 된다.

$$F_w = K_e(x_d - x_0) \quad (3)$$

여기서 K_e 는 가상 물체의 강성이다. 고정된 가상 물체와 접촉할 경우 힘 반향 장비의 위치에 의해서만 반향 되는 힘이 계산된다. 반면에, 움직이는 가상 물체와 접촉할 경우 힘 반향 장비의 위치와 가상 물체의 위치에 상대적인 움직임에 의해 반향 되는 힘이 계산된다.

햅틱 시스템에서 안정화 알고리즘으로 개발된 에너지 제한 알고리즘[16]을 속도 모드 양방향 원격 조작 시스템으로 확장하기 위해 그림 1의 블록 (A)를 힘 반향 장비의 위치를 받아서 반향 되는 힘을 제공하는 점에서 햅틱 시스템의 가상 환경과 등가 시킬 수 있다. 속도 모드 양방향 원격 조작에서 조작자가 원하는 슬레이브의 속도와 슬레이브의 실제 속도는 각각 힘 반향 장비의 위치와 움직이는 가상 물체의 위치로 대응된다. 이에 따른 수동성 조건은 수식 (4)과 같다.

$$P_H(n) + \sum_{k=0}^{n-1} F_d(k) \Delta r_d(k+1) + \varepsilon_0 \geq 0 \quad (4)$$

여기서 P_H 는 힘 반향 장비의 에너지이고 $\Delta r_d(k+1) = r_d(k+1) - r_d(k)$ 이다.

마스터 에너지 제한 알고리즘의 control law와 bounding law는 다음과 같다.

Control Law:

$$F_m[k] = F_m[k-1] + \beta_m[k] \Delta x_m[k] \quad (5)$$

여기서 $\beta_m[k] = \frac{F_{md}[k] - F_m[k-1]}{\Delta x_m[k]}$ for $\Delta x_m[k] \neq 0$

Bounding Laws:

$$\text{if } \beta_m[k] > \beta_{s,\max}[k] \text{ then } \beta_m[k] = \beta_{s,\max}[k] \quad (6)$$

$$\text{if } \beta_m[k] < \beta_{s,\min}[k] \text{ then } \beta_m[k] = \beta_{s,\min}[k] \quad (7)$$

여기서

$$\beta_{s,\max}[k] = \min(c_m, \gamma_{m,\max}[k]) \text{ and } \beta_{m,\min}[k] = \gamma_{m,\min}[k],$$

$$\gamma_{m,\max}[k] = c_m - \frac{F_m[k-1]}{\Delta x_m[k]} + \sqrt{c_m^2 + \left(\frac{F_m[k-1]}{\Delta x_m[k]}\right)^2},$$

$$\gamma_{m,\min}[k] = c_m - \frac{F_m[k-1]}{\Delta x_m[k]} - \sqrt{c_m^2 + \left(\frac{F_m[k-1]}{\Delta x_m[k]}\right)^2}$$

이고 c_m 은 양수이다.

IV. 속도 모드 양방향 원격 조작 실험

속도 모드 양방향 원격 조작용 에너지 제한 알고리즘의 성능을 평가하기 위해 i) 시간 지연이 없는 환경에서 낮은 민감도(K_s)와 높은 민감도를 갖는 시스템 실험, ii) 가변적인(variable) 시간 지연이 있는 환경에서 자유 공간 운행 중 속도를 유지 시키고 변화 시키는 실험, iii) 가변적인 시간 지연이 있는 환경에서 자유 공간 운행 중 슬레이브 로봇이 장애물과 충돌 실험이 수행되었다.

가변적인 시간지연을 제공하기 위해 통신용 에뮬레이터인 LINUX 기반의 NIST Net [19]을 사용하여 마스터와 슬레이브 단을 연결해 주었고 왕복 시간지연 200ms, 가변 시간 10ms를 사용하였다. 또한 마스터 장비는 그림 3(a)와 같이 최대 힘이 20N, 작업 영역이 200mm인 1000Hz로 구동되는 1자유도 힘 반향 장비와 그림 3(b)의 슬레이브 로봇을 이용하여 실험을 수행하였다. 슬레이브 로봇은 내부 포지션 제어가 125Hz로 구동되는데 외부 제어기인 임피던스 제어기는 내부 제어기 보다 느리게 구동 되어야 하기 때문에 50Hz로 구동하였다. 일반적으로 힘 반향 시스템에서 샘플링 속도는 빠르면 빠를수록 좋은 성능을 발휘하는데 슬레이브의 느린 샘플링 속도로 인해 기존의 시뮬레이션 모델을 이용한 실험 [15]보다 열악한 실험환경에서 다양한 실험이 수행되었다. 또한 실험에 사용된 파라미터는 다음과 같다.

$$\alpha=1, \quad c_1 = 5 \text{Ns/m}$$

여기서 c_1 은 햅틱 장비의 물리적 댐핑에 따라 정해진다.

1. 민감도 실험

조작자가 속도감을 민감하게 느끼고자 할 때 높은 민감도를 사용할 수 있고 둔감하게 느끼고자 할 때 낮은 민감도를 사용할 수 있다. 하지만 위에서 언급 했듯이 높은 민감도는 시스템 이득이기 때문에 시스템의 불안정성을 초래한다. 그

(a)

(b)

그림 3. 실험 장비.

Fig. 3. Experimental setup.

림 4는 시간 지연이 없는 환경에서 낮은 민감도($K_s = 10 \text{Ns/m}$)를 갖는 실험 결과이다. 자유 공간에서 슬레이브의 속도를 유지시키거나 변화시키더라도 안정된 작동이 가능함을 확인할 수 있다. 하지만 그림 5(a)는 높은 민감도($K_s = 1000 \text{Ns/m}$)를 갖는 실험 결과이다. 자유 공간에서 슬레이브의 속도를 유지하고자 할 때 높은 주파수의 진동이 발생함을 확인할 수 있다. 이에 위에서 제안한 에너지 제한 알고리즘을 사용하면 그림 5(b)와 같이 슬레이브를 안정하게 조작할 수 있음

그림 4. 낮은 민감도 실험.

Fig. 4. Low sensitivity experiment.

(a) Without EBA.

(b) With EBA.

그림 5. 높은 민감도 실험.

Fig. 5. High sensitivity experiment.

을 확인 할 수 있다. 또한 조작자에게 제공되는 힘(F_d)의 궤적도 속도 차에 의해 계산된 힘(F_e)과 비슷하여 조작자가 충분히 속도감을 느낄 수 있다.

2. 자유 공간 운행 실험

통신 채널에 의한 시간 지연이 발생할 경우 낮은 민감도를 갖는 시스템에서도 불안정성이 발생하게 된다. 그림 6은 가변적인 시간 지연이 발생하는 환경에서 낮은 민감도를 갖고 자유 공간 운행 실험을 한 결과이다. 에너지 제한 알고리즘을 사용하지 않을 경우 그림 6(a)와 같이 슬레이브의 속도를 일정하게 유지하고자 할 때 시간 지연으로 인한 위상 지연으로 인해 불안정성이 발생하게 된다. 하지만 그림 6(b)와 같이 에너지 제한 알고리즘을 사용할 경우 슬레이브의 속도를 유지하거나 변화시킬 때 안정성을 보장하며 속도감에 대한 정보를 힘 정보를 통해 제공할 수 있음을 확인 할 수 있다.

3. 충돌 실험

양방향 원격 제어에서 강성이 큰 장애물과의 충돌은 시스템의 불안정성을 초래한다. 그림 7은 200ms의 가변적인 시간지연이 발생하는 환경에서 슬레이브가 160kN/m의 강성을 갖는 장애물과 충돌에 대한 실험 결과이다. 그림 7(a)과 같이 에너지 제한 알고리즘을 사용하지 않은 경우로 장애물 충돌 전, 후에 속도 차이의 위상 차로 인한 불안정성을 보이고 있다. 하지만 그림 7(b)는 에너지 제한 알고리즘을 사용함으로써 장애물 충돌 전, 후로 안정한 움직임을 보이고 있고 장애물 충돌에 대한 정보를 힘 반향을 통해 제공하고 있음을 확인 할 수 있다.

그림 6. 자유 공간 운행 실험.

Fig. 6. Free space motion experiment.

V. 결론

본 논문에서는 무인화 기술 중 하나인 속도 모드 양방향 원격 제어의 안정화 알고리즘을 실제 실험 환경에서 성능을 평가하였다. 마스터 장비의 위치를 슬레이브 로봇의 속도 정보로 제공하였고 조작자가 원하는 속도와 슬레이브 로봇의 실제 속도의 차이에 의해 힘 반향을 하였다. 실제 실험을 위해 1자유도 힘 반향 장비를 마스터 장비로 사용하고 산업용 로봇을 슬레이브 로봇으로 사용하였다. 슬레이브 로봇에 임피던스 제어를 사용하였고 마스터 단에 속도 모드 에너지 제한 알고리즘을 사용하였다. 통신 채널의 가변적인 시간 지연을 위해 NIST Net을 사용하여 200ms의 왕복 시간 지연과 10ms의 가변 시간 지연을 제공해 주었다. 시간 지연이 없는 환경에서 높은 민감도(시스템 이득)를 갖는 시스템에서 발생하는 불안정성을 제단된 에너지 제한 알고리즘을 통해 해결할 수 있음을 보였다. 또한 시간 지연이 있는 환경에서는 낮은 민감도의 시스템임에도 자유 공간 운행이나 충돌 운행에서 불안정성을 발생시킨다. 이에 속도 모드 에너지 제한 알고리즘을 사용함으로써 안정성을 보장 할 수 있음을 보였다. 이 결과는 [15]에서 시뮬레이션 모델을 갖고 실험한 결과와 비슷한 결과를 보였다. 더욱이 슬레이브 로봇이 50Hz로 구동되는 더욱 열악한 실험 환경에서도 안정화 알고리즘의 우수한 성능을 검증 할 수 있었다.

앞으로 양방향 원격 조작에서 다양한 작업을 정밀하게 수행하기 위해 투명성을 높이는 연구를 진행 할 것이다. 특히

그림 7. 충돌 실험.

Fig. 7. Contact motion experiment.

우주 로봇 원격 조작에 있어서 6-7초의 시간 지연이 발생하기 때문에 안정성 및 투명성에 큰 문제가 발생하게 된다. 에너지 제한 알고리즘은 시간 지연에 매우 강한 알고리즘으로 우주 로봇 원격 조작을 할 때 안정화를 위한 알고리즘으로 충분히 사용 가능하다. 하지만 다른 안정화 제어 기법들과 마찬가지로 투명성을 떨어트리는 단점이 있다. 이에 에너지 제한 알고리즘과 슬레이브 모델 기반의 예측 제어기법을 접목함으로써 투명성을 높이는 연구를 진행 할 것이다. 또한 우주 로봇을 이용한 원격 조작에서 위치 모드와 속도 모드를 스위칭해서 사용함을 통해 큰 작업 영역에서 섬세한 작업을 수행 할 수 있다. 이에 위치 모드와 속도 모드 양방향 원격 조작 에너지 제한 알고리즘을 자연스럽게 스위칭하는 연구를 진행할 것이다.

참고문헌

- [1] T. B. Sheridan, "Space teleoperation through time delay: review and prognosis," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 9, no. 5, pp. 592-606, 1993.
- [2] P. F. Hokayem and M. W. Spong, "Bilateral teleoperation: An historical survey," *Automatica*, vol. 42, pp. 2035-2057, 2006.
- [3] W. S. Kim, F. Tendick, S. R. Ellis, and L. W. Stark, "A comparison of position and rate control for telemanipulation with consideration of manipulator system dynamics," *IEEE Transactions on Robot Automation*, vol. 3, no. 5, pp. 426-436, 1987.
- [4] P. D. Lawrence, S. E. Salcudean, N. Sepehri, D. Chan, S. Bachmann, N. Parker, M. Zhu, and R. Frenette, "Coordinated and force feedback control of hydraulic excavators," *Proc. of International Symposium of Experimental Robotics*, Stanford, CA, pp. 114-121, 1995.
- [5] P. B. David and S. C. Michael, "Haptic communication for remote mobile manipulator robot operations," *American Teleguidance Motion Commands and Can Also Observe in Nuclear Society, Proc. 8th Topical Meeting on Robotics & Realtime the Sequential Creation of the Remote Environment Remote System*, 1999.
- [6] S. Lee, G. S. Sukhatme, G. J. Kim, and C.-M. Park, "Haptic control of a mobile robot: a user study," *Proc. of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robotics and Systems*, Lausanne, Switzerland, 2002.
- [7] D. J. Lee, O. Martinez-Palafox, and M. W. Spong, "Bilateral teleoperation of a wheeled mobile robot over delayed communication network," *Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 3298-3303, 2006.
- [8] O. M. Palafox, D. J. Lee, and M. W. Spong, "Bilateral teleoperation of mobile robot over delayed communication network: Implementation," *Proc. of IEEE/RSJ International Conf. on Intelligent Robotics and Systems*, pp. 4193-4198, 2006.
- [9] J. Yoo and T. Lee, "A study on the teleoperation of the unmanned grounded vehicle for improving telepresence," *Journal of Institute of Control, Robotics and System (in Korean)*, vol. 16, no. 6, pp. 553-558, 2010.
- [10] S. E. Salcudean, M. Zhu, W. H. Zhu, and K. Hashtrudi-Zaad, "Transparent bilateral teleoperation under position and rate control," *International Journal of Robotics Research*, vol. 19, no. 12, pp. 1185-1202, 2000.
- [11] F. Mobasser and K. Hashtrudi-Zaad, "Transparent rate mode bilateral teleoperation control," *International Journal of Robotics Research*, vol. 27, no. 1, pp. 57-72, 2008.
- [12] D. A. Lawrence, "Stability and transparency in bilateral teleoperation," *IEEE Transactions on 13 Robotics and Automation*, vol. 9, no. 5, pp. 624-637, 1993.
- [13] I. Farkhatdinov, J.-H. Ryu, and P. Jury, "A feasibility study of time-domain passivity approach for bilateral teleoperation of mobile manipulator," *Proc. of International Conference on Control, Automation and Systems*, 2008.
- [14] B. Hannaford and J.-H. Ryu, "Time domain passivity control of haptic interfaces," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 18, no. 1, pp. 1-10, 2002.
- [15] S. Park, C. Seo, J.-P. Kim, and J. Ryu, "Robustly stable rate-mode bilateral teleoperation using an energy-bounding approach," *Mechatronics*, vol. 21, no. 1, pp. 176-184, Feb. 2011.
- [16] J.-P. Kim and J. Ryu, "Robustly stable haptic interaction control using an energy-bounding algorithm," *International Journal of Robotic Research*, vol. 29, no. 6, pp. 666-679, 2010.
- [17] S. Park, C. Seo, and J. Ryu, "A comparative study on force reflection methods in time-delayed bilateral rate-mode teleoperation," *The 5th International Conference on the Advanced Mechatronics*, pp. 609-614, 2010.
- [18] M. Vukobratovic, D. Surdilovic, Y. Ekalo, and D. Katic, "Dynamics and Robust Control of Robot-Environment Interaction," *World Scientific*, 2009.
- [19] M. Carson and D. Santay, "NIST net: A linux-based network emulation tool," *ACM Computer Communication Review*, vol. 33, no. 3, 2003.

박 성 준

2007년 국민대학교 기계·자동차공학부 졸업(공학사). 2010년 광주과학기술원 기전공학과 졸업(공학석사). 2010년~현재 광주과학기술원 기전공학과 박사과정 재학중. 관심분야는 양방향 원격 조작 제어, 햅틱 인터페이스 개발.

서 창 훈

2003년 부산대학교 전자전기통신공학부 졸업(공학사). 2005년 광주과학기술원 기전공학과 졸업(공학석사). 2005년~현재 광주과학기술원 기전공학과 박사과정 재학중. 관심분야는 양방향 원격 조작 제어, 햅틱 안정화 제어, 햅틱 인터페이스 개발.

류 제 하

1982년 서울대학교 기계공학과 졸업(공학사). 1984년 한국과학기술원 기계공학과 졸업(공학석사). 1991년 Iowa 주립대학교 기계공학과 졸업(공학박사). 광주과학기술원 정보기전공학부(기전공학과) 교수. 관심분야는 햅틱 상호 작용, 햅틱 모델링 및 렌더링, 양방향 원격 조작 제어.