

원격조종 로봇의 안전한 물체 접근을 위한 제어기 구성

신완재*, 박장현#

Controller Design for a Robot's Safe Contact on an Object

Wanjae Shin*, Jahng-Hyon Park #

ABSTRACT

A robot manipulator is usually operated in two modes: free and constrained motion modes, depending on whether the robot is in contact with an environment or not. At the moment of contact, an impact occurs and can exert harmful effects to the robot or the object. In case of teleoperation, since a user may give an inadequately excessive velocity command to the slave due to insufficient visual information, the robot may collide the object with an excessive speed and it possibly deteriorates the robot's performance causing vibrations and at worst, shortens its lifetime by its fracture. In this article, a new algorithm is proposed by introducing a command signal modification method on the basis of impedance control and validity of the proposed algorithm is demonstrated by performing simulations and experiments.

Key Words : Impact (충격량), Collision (충돌), Impedance control (임피던스 제어), Signal Modification (명령신호 변경), Teleoperation (원격제어)

1. 서론

로봇 매니플레이터의 운동상태는 물체(object)와의 접촉이 없는 자유운동(Free motion)과 접촉이 있는 제한운동(Constraint motion)으로 나눌 수 있다. 로봇의 사용 목적에 따라 물체를 집거나 미는 등의 제한운동의 대상이 되는 환경과 이동로봇의 장애물 회피 등과 같이 피해야 하는 환경이 있는데, 피해야 하는 환경에 대한 대처는 장애물 회피¹ 등의 방법을 이용해 피하게 되지만 물체를 집는다거나 물체를 누르는 운동이 필요한 경우 환경에 접근하여 접촉하여야 하며 이럴 때 로봇과 환경과의 충돌 발생은 불가피하다. 이미 환경의 위치와 형상

(geometry)를 알고 있는 경우에는 경로계획을 통하여 어느 정도 대처를 할 수 있으나 조작자가 명령을 내리는 원격조종 로봇의 경우에는 조작자가 의도하지 않은 큰 충돌이 발생할 수 있다.

이때 발생하는 충격에 의하여 로봇은 진동이 발생하여 작업성능이 저하되거나 충격이 과도할 경우 로봇 구조물의 수명에 치명적인 영향을 줄 수 있다. 이러한 충격력을 최소화하기 위하여 크게 2 가지 방향으로 연구되어 왔다. 첫 번째는 하드웨어적으로 접근방법으로, 스프링과 전기 브레이크를 이용하여 기계적 임피던스를 변화시키는 방법,¹⁵ 여유자유도 관절을 가진 로봇을 이용하여 충돌 시 가장 충격이 작을 자세를 취하도록 하는

☞ 접수일: 2005년 5월 12일; 게재승인일: 2006년 2월 10일

* 현대자동차

교신저자: 한양대학교 기계공학부

E-mail jpark@hanyang.ac.kr Tel. (02) 2220-0448

방법² 등이 제안되었다. 두 번째 방향으로 는 소프트웨어적으로 능동 컴플라이언스를 제공하도록 제어기를 구성하는 것이다. 천이상태에서 매니플레이터가 bounce off-back 을 할 때 액추에이터에 힘을 줬을 시간 동안 단속시키는 Natural Admittance/Time-Delay Control: NAC/TDC^{3,4}, 환경과 끝점과의 거리, 혹은 접촉힘의 방향에 따라 임피던스 제어기의 이득을 변경시키는 Stiffness Modulation 방법^{5,6,7} 등이 제안되었다. 기계적 임피던스 변화기를 사용하는 방법과 여유자유도를 이용한 방법은 기존 로봇의 구조를 여유자유도 로봇으로 변경하여야 하고, 충돌 시 특정자세를 취함으로써 임의의 방향으로의 작업을 가능케 하는 여유자유도의 장점을 포기해야 하는 단점이 있으며 NAC/TDC 의 경우는 접촉시의 충격자체를 줄이지는 못하는 문제점이 있다. 또한 Stiffness Modulation 방법의 경우 안정적으로 작동할 수 있는 이득값(gain)의 변화범위를 미리 구해야 하는 불편함이 있다.

본 논문은 임피던스 제어를 기반으로 하여 제어기 이득값의 변화 없이, 명령신호를 상황에 따라 변화시키는 방법을 통해 자유운동에서 물체와 접촉 시 충격력을 최소화시키는 방법을 제안하고자 한다. 2 장에서는 충격에 대한 해석을 하고 3 장에서는 제안된 방법을 소개하고, 4 장에서 시뮬레이션과 실험 결과를 보이고 5 장에서 결론을 보인다.

2. 충격해석

로봇이 환경과 상호작용을 할 때 로봇의 운동은 앞장에서 서술한 자유운동과 제한운동, 그리고 Fig. 1 과 같이 자유운동에서 제한운동으로 변환될 때 짧은 시간 동안 접촉과 비접촉이 반복되는 천이상태(transition state)가 발생한다.

Zheng, Hemami⁹ 와 Kim, Chung, Youm² 는 미소시간에 발생하는 단단한 외부환경과의 충돌에 대한 해석을 시도하였는데, n 자유도를 가지는 로봇 팔의 운동 방정식이 식(1)과 같을 때 발생하는 충격량은 식 (2)로 표현될 수 있다.^{2,10,12}

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q}) + G(q) = \tau_c + J(q)^T F_c \quad (1)$$

$$F_{imp} = -\frac{(1+e)\dot{p}^T n}{n^T (JM^{-1}J^T)n} \quad (2)$$

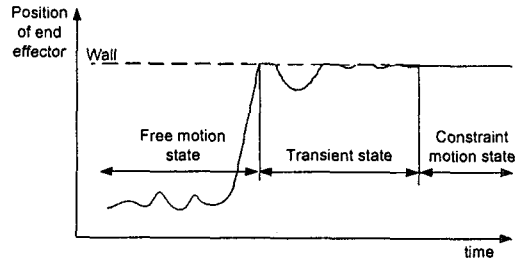


Fig. 1 Impact model: states transition from free motion state to constraint motion state in case with hard environment

여기서 $M(q) \in R^{n \times n}, C(q, \dot{q}) \in R^{n \times n}, G(q)$ 는 각각 관절 좌표계로 표현된 매니플레이터 관성 텐서, 코리올리와 구심력 관련항, 중력항을 뜻하며, τ_c 는 관절 액추에이터가 내는 힘, F_c 는 환경이 로봇의 끝점(endeffector)에 가하는 힘, $J(q)$ 는 관절각 속도를 매니플레이터 끝점의 속도로 사상시키는 자코비안이며, F_{imp} 는 충격량, \dot{p} 는 충돌 직전의 끝점의 속도, e 는 끝점과 물체 사이의 탄성계수, n 은 물체 표면의 법선방향 벡터이다.

식 (2)를 보면 충격량은 매니플레이터의 형상 (q) 와 충돌 직전의 속도 (\dot{p}) , 환경 표면의 법선방향 벡터 (n) 의 함수임을 알 수 있다. 본 논문에서는 이러한 요소 중 충돌 직전의 속도를 변화시킴으로써 충격량을 감소시키고자 한다

3. 명령신호변환을 통한 충격량 감소

로봇과 환경과의 원하는 임피던스 관계(desired impedance)를 표현하면 다음과 같다.

$$M_d \ddot{x}_c + B_d \dot{x}_c + K_d x_c = F_c \quad (3)$$

where $x_c = x - x_d$

또한 기구학적 관계식

$$\begin{aligned} \dot{x} &= J(q)\dot{q} \\ \ddot{x} &= \dot{J}(q)\dot{q} + J(q)\ddot{q} \end{aligned} \quad (4)$$

를 이용하여 (3), (4)를 (1)에 대입하여 정리하면 임피던스 제어기 (impedance controller)는 식 (5)

와 같이 구성된다.

$$\begin{aligned} \tau_c = & -MJ^{-1}J\dot{q} - J^T F_c + C(\dot{q}, q) \\ & + MJ^{-1}M_d^{-1}(F_c - B_d\dot{x}_c - K_d x_c) \end{aligned} \quad (5)$$

식 (5)를 보면 제어입력 τ_c 는 자유공간에서 x_c, \dot{x}_c 에 의해 제어되며 접촉 시에는 x_c, \dot{x}_c 와 힘 F_c 에 의해 제어된다. 따라서 로봇 매니플레이터의 끝점이 물체와 가까워져 Fig. 2 에서와 같이 위치지령 x_d 가 충돌 위험 지역인 x_{alert} 이상(ϵ 영역 안) 위치하고 위치 지령이 물체 안쪽에 있을 때 위험 지역 안에서의 새로운 위치/속도 지령은 식 (6)과 같이 변하게 한다.

if $x \cdot t > x_{alert} \cdot t$ and $x_d \cdot t > x_w \cdot t$,

$$x_{d_new} = \left[\frac{|x_d - x_w| - \gamma}{|x_{alert} - x_w|} (x \cdot t) + x_d \cdot t - \frac{|x_d - x_w| - \gamma}{|x_{alert} - x_w|} (x_{alert} \cdot t) \right] t \quad (6)$$

$$\dot{x}_{d_new} = \frac{|x_d - x_w| - \gamma}{|x_{alert} - x_w|} (\dot{x} \cdot t) t$$

else

$$x_{d_new} = x_d$$

$$\dot{x}_{d_new} = \dot{x}_d$$

$$\text{where } t = \frac{1}{|x_d - x|} (x_d - x)$$

여기서 γ 는 로봇 매니플레이터가 벽에 접촉할 수 있도록 하는 변경된 명령 신호가 가질 수 있는 최소값을 표현하는 오프셋이다. 따라서 물체에 가까워짐에 따라 x_c 의 크기를 작게 해주면 τ_c 가 작아지게 되며, 이는 충돌 직전의 속도(\dot{p})가 기존의 위치명령을 사용하는 것보다 작게 되어 충격량을 줄일 수 있다.

이득값을 변화시켜 충격량을 줄이는 방법^{5,6,7}은 이득이 변함에 따라서 변하는 시스템 안정성을 미리 계산하여 이득의 변화 범위를 선정해야 하는 어려움이 있는데 비해서 본 논문에서 제안하는 방법은 제어 명령을 변경하기 때문에 시스템 안정성에 영향을 끼치지 않는다.

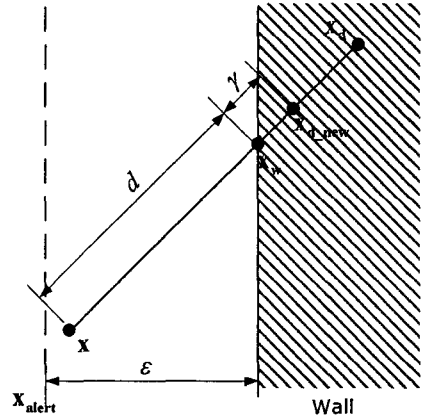


Fig. 2 Command Signal Modification Method

한편, 로봇 매니플레이터의 끝점이 물체에 접촉하였을 때 천이 상태는 환경의 반발력에 의해 떨어졌다가 제어기의 작용으로 다시 접근하여 접촉을 반복하는 형태로 나타난다. 이러한 현상이 발생할 때 탄성법칙¹¹에 따라 첫 번째 접촉 시에 가장 큰 충격량을 갖게 되며 이를 줄이기 위해서 명령 신호인 지령위치(desired position) x_d 가 물체까지의 거리(x_w)보다 멀리 있고 매니플레이터의 끝점위치가 x_{alert} 보다 멀리 있고 첫 번째 접촉이 일어나지 않은 경우에만 위치, 속도 명령을 식 (6)과 같이 변화시킨다. 1 번째 접촉이 일어난 후 x_d 를 원래의 값으로 되돌리게 되어 제한운동에서의 힘/위치제어를 수행한다. 또한, 매니플레이터가 환경과의 접촉을 끝내고 ϵ 보다 더 멀리 떨어진 후 다시 환경에 접근하는 경우, 과도한 충격량의 영향을 줄이기 위하여 명령 신호 변경을 위한 준비를 다시 하게 된다.

4. 시뮬레이션 및 실험

시뮬레이션은 Fig. 3 과 같이 직선운동을 하는 1 자유도를 가진 시스템을 대상으로 수행하였다. 10[kg]의 질량과 0.2[m]의 반지름을 가지며, 환경(벽)은 선형 스프링-댐핑 시스템으로 가정하고, 충분히 단단한 벽(rigid surface)을 표현하기 위하여 $K_e = 10^5[N/m]$, $B_e = 25[Ns/m]$ 로 하였다. 중력을 무시한 1 자유도 시스템에 대하여 (5)는

$$\tau_c = -F_e + \frac{M}{M_d}(F_e - B_d \dot{x}_e - K_d x_e) \quad (7)$$

로 간략화할 수 있으며, 끝점과 벽과의 임피던스 관계는 $M_d=0.1, B_d=10, K_d=90$ 으로 하였다.

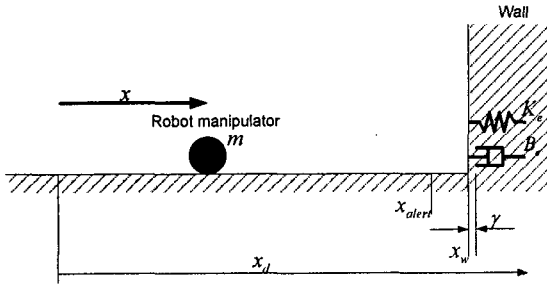
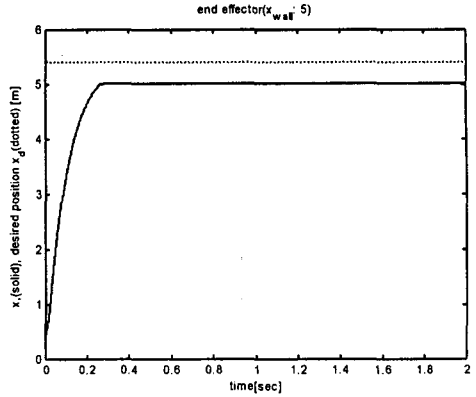


Fig. 3 1DOF simple robot manipulator for a simulation

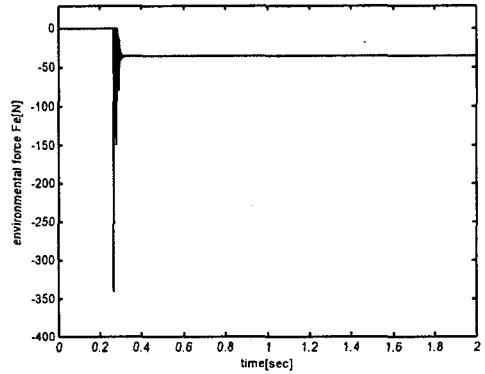
질량 m 의 초기 위치는 $0[m]$ 이며 벽의 위치(x_w)는 $5[m]$ 이고 원하는 위치(desired position, x_d)가 $5.2[m]$ 일 때, 기존의 임피던스 제어기만으로는 시뮬레이션 결과를 Fig. 4 에 도시하였다. 충돌 당시 끝점의 속도는 $4[m/s]$ 로 움직이고 있음을 Fig. 4(c)에서 보이고 있다. Fig. 4(b)에서, 충돌시의 충돌 힘은 최고 약 $-340[N]$ 이 발생한다. 이는 제한운동 상태의 일정하게 유지하려는 값 약 $-40[N]$ 보다 약 8.5 배에 달한다.

그러나 본 논문에서 제안하는 방법을 사용하여 $\epsilon=0.001[m], \gamma=0.05[m]$ 로 설정하여 같은 조건에서 시뮬레이션을 수행하면, Fig. 5(a)에서, 0.25~0.45 초 동안 desired position x_d 가 5.2 에서 새로운 지점으로 변경되어, 벽과 로봇의 충돌 시 Fig. 5(b)와 같이 약 $-60[N]$ 의 접촉 힘을 보임으로서, 기존의 방법을 사용하는 것보다 충돌 시 약 5.8 배 작은 힘을 받음을 알 수 있다.

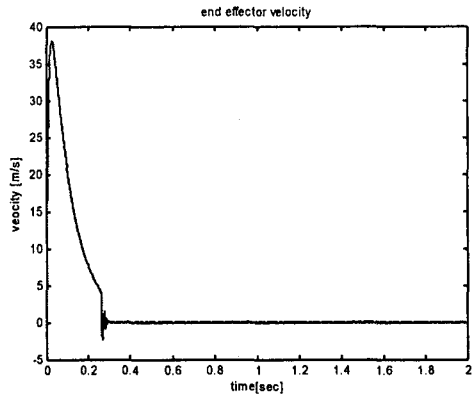
이로써 로봇이 기존의 방법보다 더 작은 충격량을 받게 됨을 알 수 있다. Fig. 5(c)를 보면 충돌 당시 속도가 $0.5[m/s]$ 로 기존의 임피던스 제어기를 사용하는 것보다 약 8 배 정도 속도가 감소되어 있음을 알 수 있다. 또한, 일정한 접촉 힘을 유지하기 위하여 첫 번째 충돌 이후에 desired position 은 원래의 값으로 다시 변환시켜주기 때문에 제한 운동 상태에서의 접촉힘은 기존의 방법을 사용한 Fig. 4(b)와 같은 약 $-40[N]$ 의 일정한 힘을 유지하게 된다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 4 Simulation results for conventional impedance control: (a) end effector trajectory (dotted: desired position) (b) contact force (c) end effector velocity

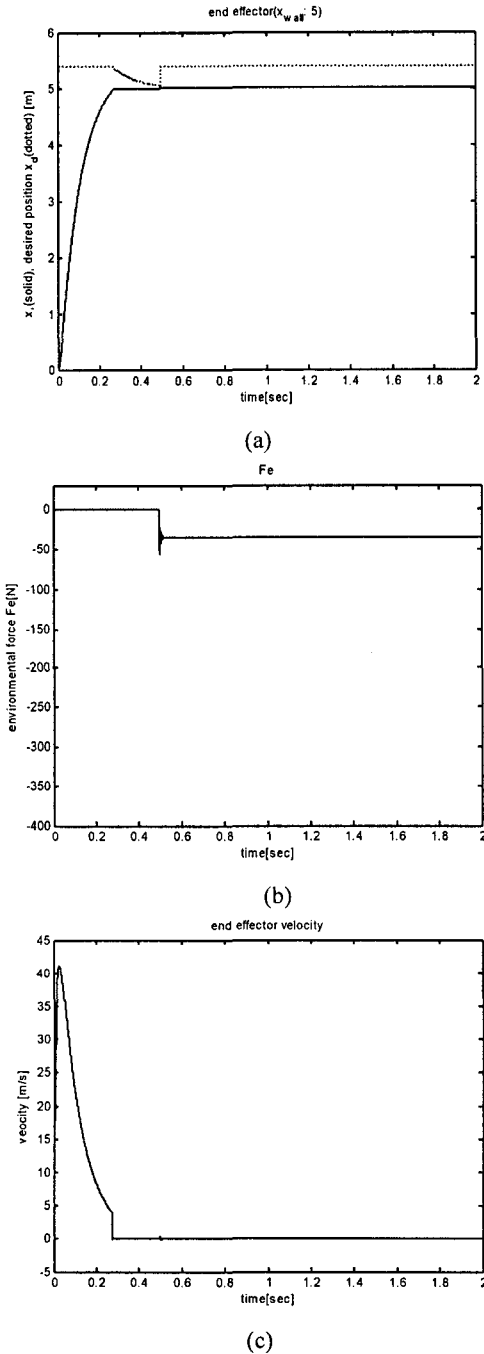


Fig.5 Simulation results for impedance control combined with the proposed method: (a) end effector trajectory (dotted: modified desired position) (b) contact force (c) end effector velocity

실험 1, 2 를 위한 장비는 Fig. 6 과 같이 회전축 (rotating axis)를 중심으로 링크가 회전하여 끝점이 물체(object)와 충돌하게 하는 1 자유도 운동을 한다. 링크의 모션제어를 위해 실시간 운영체제인 RTLinux 를 사용, 1msec 의 제어 주기로 제어하였다. 제어기는 자유운동 상태와 제한 운동 상태 모두에서 사용할 수 있는 임피던스 제어기를 사용하였고, 충돌의 크기를 측정하기 위하여 로봇의 끝점에 6축 힘/토크센서(F/T sensor)를 부착하였다.

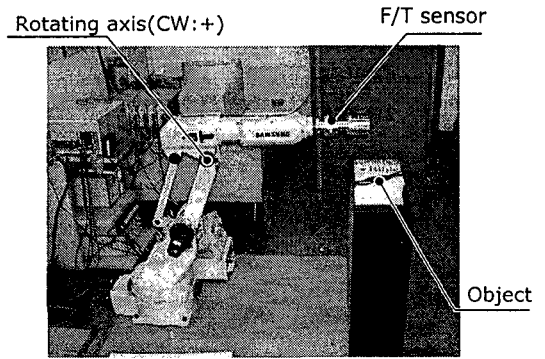
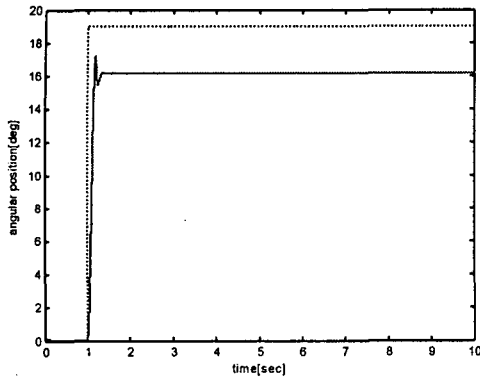


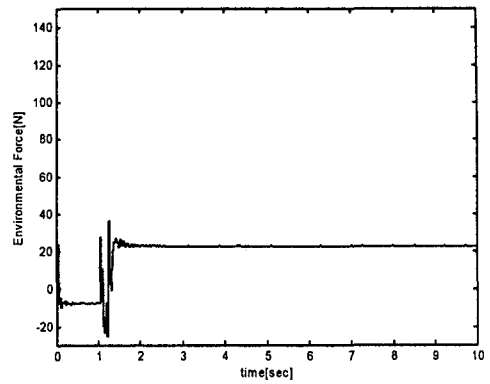
Fig. 6 Experimental setup (elbow down is positive direction)

실험 1 은 $t = 1\text{sec}$ 에서 물체너머의 위치로 명령신호가 가해졌을 때의 기존의 실험결과를 Fig. 7 에, 명령신호변환 방식을 사용한 실험 결과를 Fig. 8 에 도시하였으며 이때 $\gamma=0.5^\circ$, $\epsilon=5^\circ$ 를 사용하였다. 시뮬레이션 결과와 마찬가지로 제안된 방법을 사용할 경우 현저히 충격량을 줄일 수 있음을 알 수 있다. 여기서 1sec 전에 힘 센서에 감지되는 값은 힘/토크센서에 부착된 끝점의 질량에 의한 관성력이다.

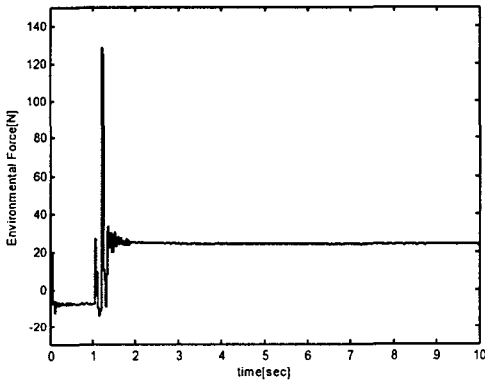
실험 2 는 본 논문에서 제안하는 방법을 원격 제어 시스템에 적용한 것이다. 원격제어를 할 때 사용자는 대상 물체와 로봇(슬레이브)이 원격지에 떨어져 있기 때문에 정확한 위치나 형상 등의 정보를 시간지연을 가지며 알게 되며 이는 물체와의 접촉을 하는 로봇의 적절한 반응을 어렵게 한다. 또한 주로 비전 카메라를 이용하여 시각적인 정보에 따라 사용자는 슬레이브에 명령을 주게 되는데 적절치 못한 슬레이브의 물체에 대한 접근 속도



(a)

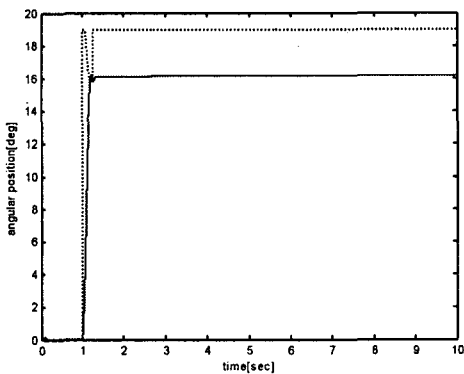


(b)



(b)

Fig. 7 Experiment 1 for conventional impedance control: (a) end effector trajectory (dotted: desired position) (b) contact force



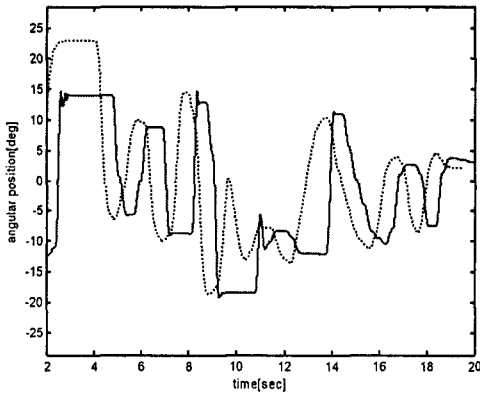
(a)

Fig. 8 Experiment 1 for impedance control combined with the proposed method: (a) end effector trajectory (dotted: modified desired position) (b) contact force

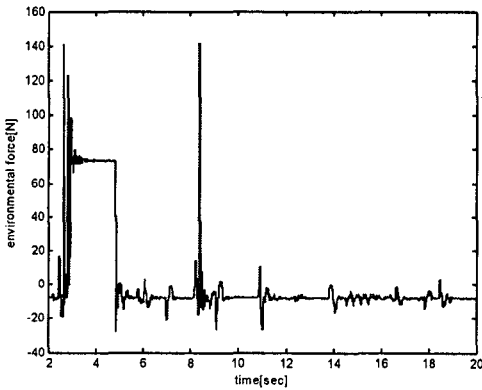
명령은 물체 혹은 로봇의 파손 등을 야기 할 수 있다. 여기서는 마스터와 슬레이브를 인터넷을 사용하여 연결하였으며 인터넷을 사용할 때 발생하는 불규칙한 시간지연의 문제점을 스트리밍 버퍼를 사용한 방법^{13,14}으로 해소하였다.

조이스틱을 이용한 마스터에서 슬레이브로 신호를 전달하여 물체에 접촉하는 실험을 하였다. 조이스틱에서 10msec 간격으로 위치 명령 신호를 전달하며 슬레이브에서는 1msec 간격으로 매니플레이터를 제어한다. 마스터의 조이스틱에서 나오는 위치신호는 사용자의 손의 떨림으로 인하여 작업성능의 저하를 방지하기 위하여 저역 통과 필터 (low pass filter)를 통과한 신호를 슬레이브에 전송을 하게 된다. 마스터와 슬레이브는 서울 → 미국 캘리포니아 → 서울을 루프백(loopback)시켜 약 30,000km의 전송 경로를 가지고 제어를 한다. 물체는 약 14°에 위치하고 있다.

기존의 원격제어 방법을 사용한 결과를 Fig. 9에 도시하였다. 슬레이브는 마스터에서 보내는 위치명령 신호를 제대로 추종하지 못하며, 또한 약 2.5초와 8.2초에서 물체와 접촉할 때 약 140N의 큰 충격을 받는다. 2.5초에서 물체와의 접촉 후 약 70N의 힘을 유지한다. Fig. 10은 스트리밍 버퍼와 명령어 변경방식을 사용하여 원격제어를 한 결과이다. 5.8초와 14.5초에서 물체와 접촉하지만 접촉력은 그리 크지 않음을 알 수 있다.

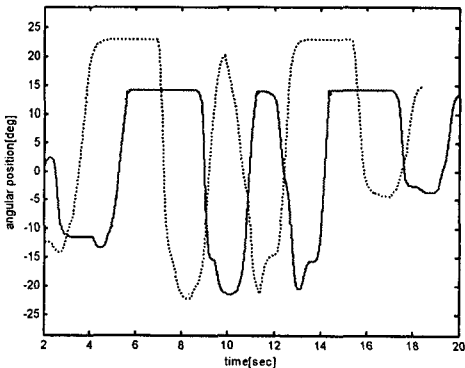


(a)

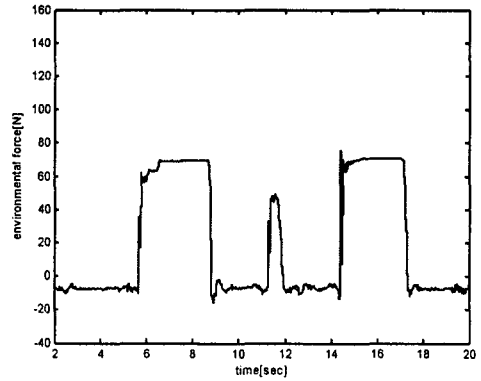


(b)

Fig. 9 Experiment 2 for conventional impedance control in long distance network: (a) master position command (dashed), slave actual position (solid) (b) contact force



(a)



(b)

Fig. 10 Experiment 2 for the Streaming Buffer and Command Modification Method in long distance network: (a) master position command(dashed), slave actual position(solid) (b) contact force

5. 결 론

본 연구에서는 로봇 매니플레이터가 물체와 충돌시 발생하는 충격량을 줄이기 위하여 충격 모델의 고찰을 통해 그 해결방안을 모색하였으며 임피던스 제어를 기반으로 하여 충돌 지점 근방에서 강제로 목표지점을 변경시킴으로써 안전한 접촉을 하도록 하였다. 이의 검증을 위하여 시뮬레이션과 실험을 수행하였다. 향후 과제로 시스템 응답시간과 충돌 위험 지역간의 상호관계의 고찰이 필요할 것으로 보이며 이에 따른 효율적인 목표값 변환 방법과 충돌 경계 구역(X_{alert})의 효율적인 설정에 대한 연구가 필요할 것으로 보인다.

참고문헌

1. Luh, J. Y. S., "A Scheme for Collision Avoidance with Minimum Distance Traveling for Industrial Robots," *Journal of Robotic System*, Vol. 1, No.1, pp.5-26, 1984.
2. Kim, Jinhyun, Chung, Wan Kyun, Youm, Youngil, "Impact Reduction for Unknown Environment Using Kinematic Redundancy," *Proc. Of Korea Automatic Control Conference*, pp. E25-E28, 1999.

3. Lee, E., Park, J., Chang, P. H., Schrader, C. B., "Hybrid Impedance/Time-Delay Control from Free Space to Constrained Motion," Proc. of the American Control Conference, pp. 2132-2137, 2003.
4. Lee, E., Park, J., Loparo, K. A., "Bang-Bang Impact Control Using Hybrid Impedance/Time-Delay Control," IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 8, No. 2, pp. 272-277, 2003.
5. Park, Jong H., Song, J. H., Cho, H. C., "Impedance Modulation for a Teleoperator Using Distance Measurement," Proc. of International Conf. on Control Automation, Robotics and Vision(ICARCV), 2000.
6. Dubey, R. V., Chan, T. F., Everett, S. E., "Variable Damping Impedance Control of a Bilateral Telerobotic System," IEEE Control Systems Magazine, Vol. 17, No. 1, pp.37-45, 1997.
7. Salcudean, S. E., Hashtrudi-Zaad, K., "Bilateral Matched-Impedance Teleoperation with Application to Excavator Control," IEEE Control Systems Magazine, Vol. 19, No. 6, pp. 29~37, 1999.
8. Colgate, J.E., "Robust Impedance Shaping Telemanipulation," IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 9, No. 4, pp. 374-384, Aug., 1993.
9. Zheng, Y. F., Hemani, H., "Mathematical Modeling of a Robot collision with Its Environment," Journal of Robotic Systems, Vol.2, pp.289-307, 1985.
10. Asada, H., Slotine, J. J., "Robot Analysis and Control," John Wiley & Sons, Inc., pp. 108-110, 1986.
11. Bedford, A., Fowler, W., "Engineering Mechanics Dynamics," Prentice Hall, pp.419-423, 2002.
12. Shin, W., Park, Jahng-H., "Controller Design for a Robot's Safe Contact on an Object," Proceedings of the KSPE Conference, pp. 929-933, Oct., 2004.
13. Park, Jahng-H., Shin, W., "Internet Teleoperation of a Robot with Streaming Buffer System under Varying Time Delays," JSME International Journal Series C, Vol.46, No. 4, pp. 1604-1610, Dec., 2003.
14. Shin, W., Park, Jahng-H., "Internet Teleoperation of an Embedded System using Streaming Buffer System," Journal of the KSPE, Vol. 21, No. 9, pp. 56-62, Sept., 2004.
15. Laurin-Kovitz, K. F., Colgate, J. E., Carnes, S. D. R., "Design of components for programmable passive impedance," Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automations, pp.1476-1481, 1991.