

로봇의 안전한 물체 접근을 위한 제어기 구성

신원재*(한양대 대학원 기계설계학과), 박장현(한양대 기계공학부)

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

Wanjae Shin*(Mech. Design and Prod. Eng., HYU), Jahng-Hyon Park(Dept. of Mech. Eng. HYU)

ABSTRACT

A robot manipulator is usually operated in two modes: free motion and constraint motion depending on whether the robot comes into contact with the environment or not. At the moment of contact, impact occurs, and sometimes, it possibly degrade the robot's performance by vibration and at worst, shortens its lifetime. In this article, a new proposed algorithm is described by introducing a command signal modification method on the basis of impedance control and a validity of the proposed algorithm is demonstrated by showing a simulation and an experiment.

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

1. 서론

로봇 매니퓰레이터의 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 회피[1] 등의 방법을 이용해 피하게 되지만 물체를 집는다거나 물체를 누르는 운동이 필요한 경우 환경에 접근하여 접촉하여야 하며 이럴 때 로봇과 환경과의 충돌 발생은 불가피하다.

이때 발생하는 충격에 의하여 로봇은 진동이 발생하여 작업성능이 저하되거나 충격이 과도할 경우 로봇 구조물의 수명에 치명적인 영향을 줄 수 있다. 이러한 충격력을 최소화하기 위하여 여유자유도 관절을 가진 로봇을 이용하는 방법[2], 액츄에이터에 힘을 뺀 시간동안 단속시키는 Natural Admittance /Time-Delay Control: NAC/TDC[3, 4], 환경과 끝점과의 거리, 혹은 접촉힘의 방향에 따라 임피던스 제어기의 계인을 변경시키는

Stiffness Modulation 방법[5,6,7] 등이 제안되었다. 여유자유도를 이용한 방법은 기존 로봇의 구조를 여유자유도 로봇으로 변경하여야 하고, 충돌시 특정자세를 취함으로써 임의의 방향으로의 작업을 가능케하는 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 변화없이, 명령신호를 상황에 따라 변화시키는 방법을 통해 자유운동에서 물체와 접촉시 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

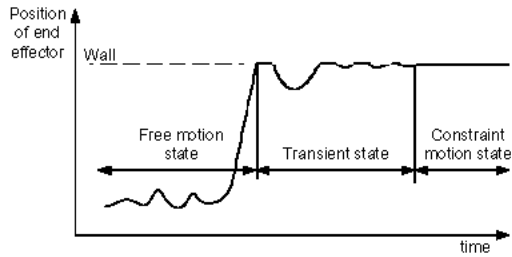


Fig. 1 Impact model: states transition from free motion state to constraint motion state in case with hard environment

Fig.1 과 같이 자유운동에서 제한운동으로 변환될 때 짧은 시간동안 접촉과 비접촉이 반복되는 천이상태(transition state)가 발생한다. Zheng, Hemami[9]와 Kim, Chung, Youm[2]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]

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

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

여기서 $M(q) \in R^{n \times n}, C(q, \dot{q}) \in R^{n \times n}, G(q)$ 는 각각 관절 좌표계로 표현된 매니퓰레이터 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 매니퓰레이터 끝점의 속도로 사상시키는 자코비안이며, F_{imp} 는 충격량, \dot{p} 는 충돌 직전의 끝점의 속도, ϵ 는 끝점과 물체 사이의 탄성계수, n 은 물체표면의 법선방향 벡터이다.

식 (2)를 보면 충격량은 매니퓰레이터의 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)가 식 (3)과 같을 때 임피던스 제어기

(impedance controller)는 식 (4)와 같이 구성된다.

$$M_d \ddot{x}_e + B_d \dot{x}_e + K_d x_e = F_e \quad (3)$$

where $x_e = x - x_d$

$$\tau_c = -MJ^{-1}J\dot{q} - J^T F_e + C(q, \dot{q}) + MJ^{-1}M_d^{-1}(F_e - B_d \dot{x}_e - K_d x_e) \quad (4)$$

식 (4)를 보면 제어입력 τ_c 는 자유공간에서 x_e, \dot{x}_e 에 의해 제어되며 접촉 시에는 x_e, \dot{x}_e 와 힘 F_e 에 의해 제어된다. 따라서 물체에 가까워 짐에 따라 x_e 의 크기를 작게 해주면 τ_c 가 작아지며, 이는 충돌 직전의 속도(\dot{p})를 줄이게 되어 충격량을 줄일 수 있을 것이다.

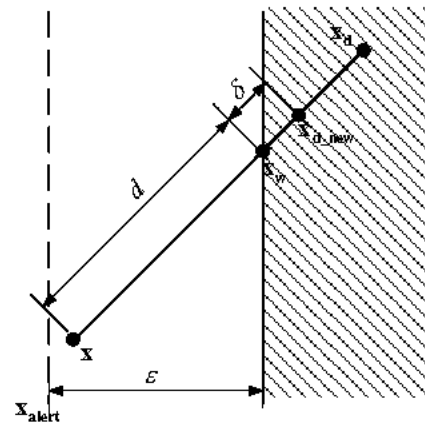


Fig. 2 Command Signal Modification Method

$$x_{d,new} = x + (d + \delta) \frac{x_w - x}{|x_w - x|}, \quad \text{if } x > x_{alert} \quad (5)$$

한편, 로봇 매니퓰레이터의 끝점이 물체에 접촉하였을 때 천이 상태는 환경의 반발력에 의해 떨어졌다가 제어기의 작용으로 다시 접근하여 접촉을 반복하는 형태로 나타난다. 이러한 현상이 발생할 때 탄성법칙[11]에 따라 첫번째 접촉 시에 가장 큰 충격량을 갖게 되며 이를 줄이기 위해서 명령 신호인 desired position x_d 가 물체까지의 거리 너머에 있고 매니퓰레이터의 끝점위치가 x_{alert} 보다 멀리 있을 때 식(5)와 같이 명령신호를 변화시킨다. 1 번째 접촉이 일어난 후 x_d 를 원래의 값으로 되돌리게 되어 제한운동에서의 힘/위치제어를 수행한다. 또한, 매니퓰레이터가 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, 물체(벽)는 선형 스프링-댐핑 시스템으로 가정하고, 충분히 단단한 벽(hard surface)을 표현하기 위하여 $K_p = 10^5[N/m]$, $K_d = 25[Ns/m]$ 로 하였다. 중력을 무시한 1 자유도 시스템에 대하여 식은

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

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

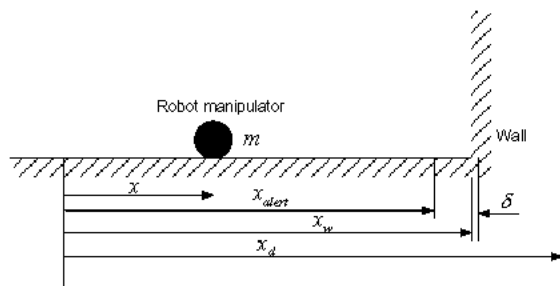


Fig. 3 1DOF simple robot manipulator for a simulation

질량 m 의 초기 위치는 0[m]이며 원하는 위치(desired position)은 5.2[m], 벽의 위치는 5[m]에 있을 때의 기존의 임피던스 제어기만으로서의 시뮬레이션 결과를 Fig. 4 에 도시하였다. Fig. 4(b)에서, 충돌시의 충돌 힘은 최고 약 -340[N]이 발생하며 이는 제한상태에서의 힘 유지 목표값인 약 -40[N] 보다 약 8.5 배에 달한다.

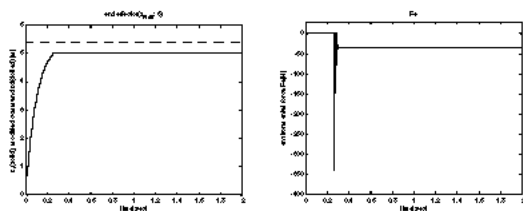


Fig. 4 Simulation result using conventional impedance control (a) end effector trajectory(dotted: desired position) (b) contact force

그러나 본 논문에서 제안하는 방법을 사용하여

$x_{alert} = 4.999[m]$, $\delta = 0.05[m]$ 로 설정하여 같은 조건에서 시뮬레이션을 수행하면, Fig. 5(a)에서, 0.2~0.4 초 동안 desired position 이 5.2 에서 (5+0.05)로 강제적으로 변환되어, 벽과 로봇의 충돌시 Fig. 5(b)와 같이 약 -70[N]의 접촉힘을 보임으로서, 기존의 방법을 사용하는 것보다 충돌시 약 4.9 배 작은 힘을 받음을 알 수 있다. 또한, 일정한 접촉 힘을 유지하기 위하여 첫번째 충돌 이후에 desired position 은 원래의 값으로 다시 변환시켜주기 때문에 접촉힘은 기존의 방법을 사용한 Fig. 3(b)와 같은 약 -40[N]의 일정한 힘을 유지하게 된다.

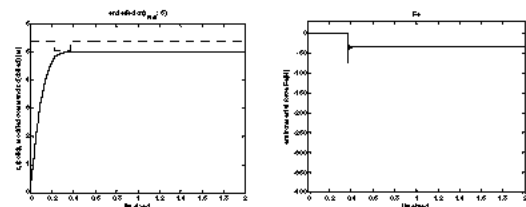


Fig. 5 Simulation result using impedance control combined with the proposed method (a)end effector trajectory(dotted: modified desired position) (b)contact force

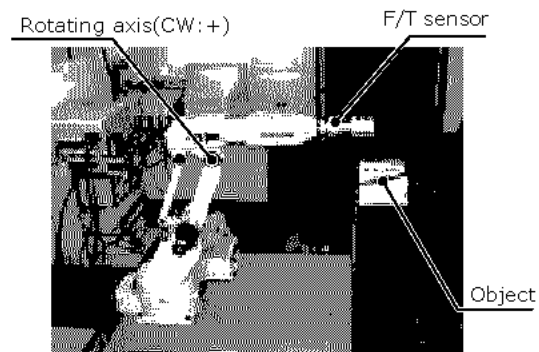


Fig. 6. Experiment setup(elbow down is positive direction)

실험을 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. 충돌의 크기를 측정하기 위하여 로봇의 끝점에 6 축 힘/토크센서(F/T sensor)를 부착하였다.

$t = 1sec$ 에서 물체너머의 위치로 명령신호가 가해졌을 때의 실험결과를 Fig. 7,8 에 도시하였다. 시뮬레이션 결과와 마찬가지로 제안된 방법을 사용할 경우 현저히 충격량을 줄일 수 있음을 알 수 있다.

여기서 1sec 전에 힘 센서에 감지되는 값은 힘/토크 센서에 부착된 끝점의 질량에 의한 것이다.

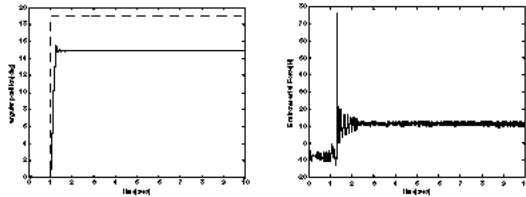


Fig. 7 Experiment result using conventional impedance control (a)end effector trajectory(dotted: desired position) (b)contact force

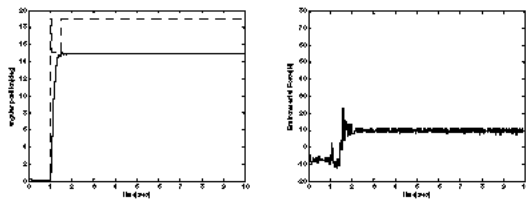


Fig. 8 Experiment result using impedance control combined with the proposed method (a)end effector trajectory(dotted: modified desired position) (b) contact force

5. 결 론

본 연구에서는 로봇 매니퓰레이터가 물체와 충돌시 발생하는 충격량을 줄이기 위하여 충격 모델의 고찰을 통해 그 해결방안을 모색하였으며 임피던스 제어기를 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 방법에 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, 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., et al, "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, Issue 1, pp37-45, 1997
7. Salcudean, S. E., Hashtrudi-Zaad, K., et al, "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. 신완재, 박장현, "로봇과 환경과의 충돌시 명령 신호 변경을 통한 충격량 감소", *대한기계학회 춘계학술대회*, pp. 929-933, 2004.