로봇과 환경과의 충돌시 명령 신호 변경을 통한 충격량 감소

신완재† · 박장현*

Impact Reduction between a Robot and an environment using Command Signal Modification

Wanjae Shin†, Jahng-Hyon Park*

Key Words : Impact(충격량), collision(충돌), Impedance control(임피던스 제어)

Abstract

A robot manipulator is usually operated in two modes: free motion and constraint motion according to the fact whether the robot comes into contact with the environment or not. At the moment of contact, impact occurs, and sometimes, it can possibly degrade the robot's performance such as 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 the simulation study.

1. 서 론

로봇 매니퓰레이터는 크게 2 가지 상황에서 운용이 되는데 장애물과의 접촉이 없는 자유운동(Free motion)과 환경과의 접촉이 있는 제한운동(Constraint motion) 상태이다. 자유운동의 경우는 로봇의 끝점(end effector)이 원하는 위치 혹은 속도가 되도록 제어기를 구성하게 된다. 환경의 성격은 크게 2 가지 용도로 구분되는데, 로봇이 물체를 집거나 미는 등의 제한운동의 대상이 되는 환경과 이동로봇의 장애물 회피 등과 같이 피해야 하는 환경이 있을 수 있다. 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.

† 한양대학교 대학원 기계설계학과
* 한양대학교 공과대학 기계공학부
E-mail : jpark@hanyang.ac.kr
TEL : (02)2290-0448 FAX : (02)2293-4062

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 단속시키는 Natural Admittance /Time-Delay Control: NAC/TDC)[3][4], 환경과 끝점과의 거리, 혹은 접촉힘의 방향에 따라 임피던스 제어기의 게인을 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 경우 지속적인 단속이 액츄에이터의 수명을 저하시킬 수 있는 문제점이 있다. 한편 Stiffness Modulation 방법의 경우 안정적으로 작동할 수 있는 이득값(gain)의 변화범위를 미리 구해야 하는 단점이 있다.

본 논문은 임피던스 제어를 기반으로 하여 이득값의 변화없이, 명령신호를 상황에 따라 변화시키는 방법을 통해 자유운동에서 환경과 접촉시 충격력을 최소화시키는 새로운 방법을 제안하고

자 한다. 2 장에서는 충격에 대한 해석을 하고 3 장에서는 제안된 방법을 소개하고, 4 장에서 시뮬레이션 결과를 보이고 5 장에서 결론을 보인다.

2. 충격 해석

로봇이 환경과 상호작용을 할 때 로봇의 운동은 앞장에서 서술한 자유운동과 제한운동, 그리고 Fig.1 과 같이 자유운동에서 제한운동으로 변환할 때 짧은 시간동안 접촉과 비접촉이 반복되는 천이상태(transition state)가 발생한다. Zheng 과 Hemami[9]는 로봇 매니퓰레이터의 천이 과정에서의 충격의 영향을 해석하였는데 충격의 해석과 모델링의 측면에서 다음과 같은 2 가지 기본적인 접근 방법이 있다.

-충격은 유한한 시간간격을 가지면서 발생한다. (무른 외부환경과의 충돌)

-충격은 미소시간 동안에 일어나는 갑작스러운 현상이다.(단단한 외부 환경과의 충돌)

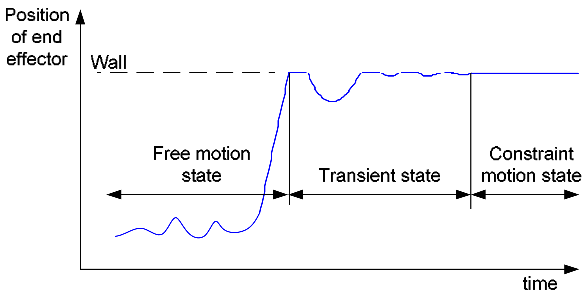


Fig. 1 impact model: states transition from free motion state to constraint motion state in case with hard environment

이 중 Kim, Chung, Youm[2]은 충격현상을 미소시간에 발생하는 단단한 외부환경과의 충돌에 대한 해석을 시도하였다.

n 자유도를 가지는 로봇 매니퓰레이터의 운동 방정식은 다음과 같다.[10]

$$\mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q},\dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{G}(\mathbf{q}) = \boldsymbol{\tau}_c + \mathbf{J}(\mathbf{q})^T \mathbf{F}_e \quad (1)$$

여기서 $\mathbf{M}(\mathbf{q}) \in R^{n\times n}, \mathbf{C}(\mathbf{q},\dot{\mathbf{q}}) \in R^{n\times n}, \mathbf{G}(\mathbf{q})$ 는 각각 관절 좌표계로 표현된 매니퓰레이터 관성 텐서(symmetric), 코리올리와 구심력 관련항, 중력항을 뜻하며, $\boldsymbol{\tau}_c$ 는 관절 액츄에이터가 내는 힘, $\mathbf{F}_e$ 는 환경이 로봇의 끝점에 가하는 힘이며, $\mathbf{J}(\mathbf{q})$ 는 관절각 속도를 매니퓰레이터 끝점의 속도로 사상시키는 자코비안이다.

충격이 시간 t 에서 발생하여 미소시간 δt 동안 지속된다고 가정하면, 윗 식을 정리하여 적분하고 $\delta t \to 0$ 로 보내면

$$\lim_{\delta t\to 0}\int_t^{t+\delta t}\mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}}dt + \lim_{\delta t\to 0}\int_t^{t+\delta t}\left\{\mathbf{C}(\mathbf{q},\dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{G}(\mathbf{q}) - \boldsymbol{\tau}_c\right\}dt = \lim_{\delta t\to 0}\int_t^{t+\delta t}\mathbf{J}(\mathbf{q})^T\mathbf{F}_e dt$$

가 되며, 로봇이 환경과 접촉하는 미소 시간동안 로봇의 각 관절의 위치가 일정하고 속도가 유한한 값을 가진다고 가정하면, $\delta t \to 0$ 에 따라 윗 식에서 2 번째 항은 0 이 된다. 따라서 윗 식은

$$\mathbf{J}^T(\mathbf{q})\lim_{\delta t\to 0}\int_t^{t+\delta t}\mathbf{F}_e dt = \mathbf{M}(\mathbf{q})\lim_{\delta t\to 0}\int_t^{t+\delta t}\ddot{\mathbf{q}}dt$$

로 정리될 수 있으며 충격량(impulse)의 정의가

$$\mathbf{F}_{imp} \triangleq \lim_{\delta t\to 0}\int_t^{t+\delta t}\mathbf{F}_e dt$$

이므로,

$$\mathbf{M}^{-1}\mathbf{J}^T\mathbf{F}_{imp} = \lim_{\delta t\to 0}\left[\dot{\mathbf{q}}(t+\delta t) - \dot{\mathbf{q}}(t)\right] = \Delta\dot{\mathbf{q}}$$

$$\mathbf{J}\mathbf{M}^{-1}\mathbf{J}^T\mathbf{F}_{imp} = \mathbf{J}\Delta\dot{\mathbf{q}} = \Delta\dot{\mathbf{p}}$$

로 표현될 수 있다. 여기서 $\Delta\dot{\mathbf{p}}$ 는 충돌 전후의 끝점의 속도 차이다. 따라서 충격량은

$$\therefore \mathbf{F}_{imp} = \left(\mathbf{J}\mathbf{M}^{-1}\mathbf{J}^T\right)^{-1}\Delta\dot{\mathbf{p}} \quad (2)$$

이 된다.

한편, 탄성법칙[11]에 따라

$$(\dot{\mathbf{p}} + \Delta\dot{\mathbf{p}})^T\mathbf{n} = -e\dot{\mathbf{p}}^T\mathbf{n}$$

의 관계가 있으며,

$$\therefore \Delta\dot{\mathbf{p}}^T\mathbf{n} = -(1+e)\dot{\mathbf{p}}^T\mathbf{n} \quad (3)$$

가 된다. 한편 충격량은 접촉면에 법선방향으로 나타나므로,

$$\mathbf{F}_{imp} = F_{imp}\mathbf{n} \tag{4}$$

이 되고, 따라서 식 (3),(4)와 (2)을 이용하면,

$$\therefore F_{imp} = -\frac{(1+e)\dot{\mathbf{p}}^T\mathbf{n}}{\mathbf{n}^{\mathbf{T}}\left(\mathbf{J}\mathbf{M}^{-1}\mathbf{J}^T\right)\mathbf{n}} \tag{5}$$

가 된다.

3. 명령신호변환을 통한 충격량 감소

식 (5)을 보면 충격량은 매니퓰레이터의 형상($\mathbf{q}$)와 충돌 직전의 속도($\dot{\mathbf{p}}$), 환경 표면의 법선방향 벡터($\mathbf{n}$)의 함수임을 알 수 있다. 본 논문은 충돌 직전의 속도를 변화시킴으로써 충격량을 감소시키고자 한다.

한편 고정좌표계(World coordinates system)에서 로봇과 환경과의 원하는 임피던스 관계(desired impedance)를 표현하면

$$\mathbf{M_d}\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{B_d}\dot{\mathbf{x}}_\mathbf{e} + \mathbf{K_d}\mathbf{x_e} = \mathbf{F_e} \quad \text{where } \mathbf{x_e} = \mathbf{x} - \mathbf{x_d} \tag{6}$$

과 같이 되고, 기구학적 관계식

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{J}\dot{\mathbf{q}} \tag{7}$$

$$\ddot{\mathbf{x}} = \dot{\mathbf{J}}\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{J}\ddot{\mathbf{q}} \tag{8}$$

을 이용하여 (6),(7),(8)를 (1)에 대입하여 정리하면,

$$\begin{aligned}\boldsymbol{\tau}_\mathbf{c} = &-\mathbf{M}\mathbf{J}^{-1}\dot{\mathbf{J}}\dot{\mathbf{q}} - \mathbf{J}^\mathbf{T}\mathbf{F_e} + \mathbf{C}(\dot{\mathbf{q}},\mathbf{q}) \\ &+ \mathbf{M}\mathbf{J}^{-1}\mathbf{M}_\mathbf{d}^{-1}(\mathbf{F_e} - \mathbf{B_d}\dot{\mathbf{x}}_\mathbf{e} - \mathbf{K_d}\mathbf{x_e})\end{aligned} \tag{9}$$

이 된다. 식 (9)을 보면 제어입력 $\boldsymbol{\tau}_\mathbf{c}$ 는 자유공간에서 $\mathbf{x_e}$ 의 변화에 의해 제어되며 접촉 시에는 $\mathbf{x_e}$ 와 힘 $\mathbf{F_e}$ 에 의해 제어된다. 따라서 환경에 가까워 짐에 따라 $\mathbf{x_e}$ 의 크기를 작게 해주면 $\boldsymbol{\tau}_\mathbf{c}$ 가 작아지며, 이는 충돌 직전의 속도($\dot{\mathbf{p}}$)를 줄이게 되어 충격량을 줄일 수 있게 된다. 이러한 제어 알고리즘을 Fig. 2 에 나타낸 바와 같이 구현하였다.

로봇 매니퓰레이터가 일정한 속도로 접근하여 환경에 충돌하였을 때 천이 상태는 환경의 반발력에 의해 떨어졌다가 제어기의 작용으로 다시 접근하여 접촉을 반복하는 형태로 나타난다. 이러한 현상이 발생할 때 탄성법칙에 따라 첫번째 접촉 시에 가장 큰 충격량을 갖게 되며 이를 줄이기 위해서 명령 신호인 desired position $\mathbf{x_d}$ 가 환경까지의 거리 너머에 있을 경우, 매니퓰레이터와 환경과의 거리가 미리 지정된 값 ε보다 작게 될 때, 식 (9)에서 $\mathbf{x_e} = \mathbf{x} - \mathbf{x_d}$ 의 $\mathbf{x_d}$ 를 환경까지의 거리와 효율적인 접촉을 위한 여유값을 더한 $\mathbf{x}_w + \delta$ 로 변화시킨다. 이렇게 하여 임피던스 제어기가 작용하고, 1 번째 접촉이 일어난 후 $\mathbf{x_d}$ 를 원래의 값으로 되돌리게 된다. 또한, 매니퓰레이터가 환경과의 접촉을 끝내고 ε보다 더 멀리 떨어진 후 다시 환경에 접근하는 경우, 과도한 충격량의 영향을 줄이기 위하여 명령 신호 변경을 위한 준비를 다시 하게 된다.

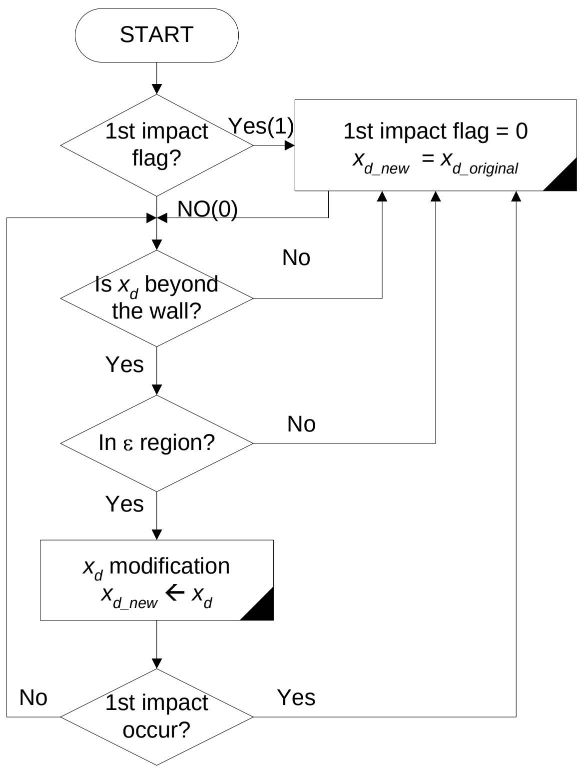


Fig. 2 Flowchart of Command Signal Modification Method

4. 시뮬레이션

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 Kp = 10^5[N/m], Kd = 25[Ns/m]로 하였다. 중력을 무시한 1 자유도 시스템에 대하여 식(9)은

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

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

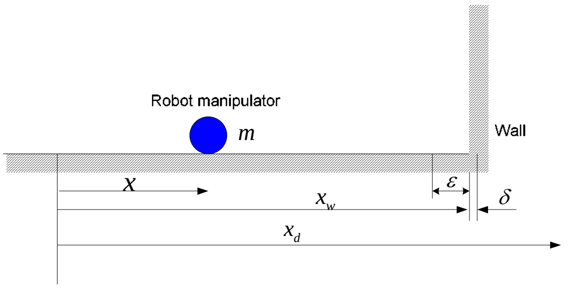
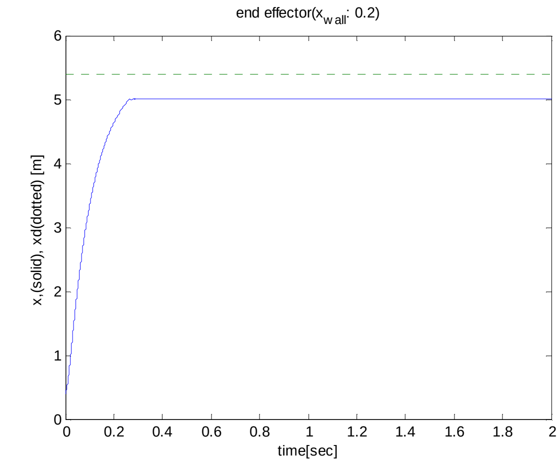


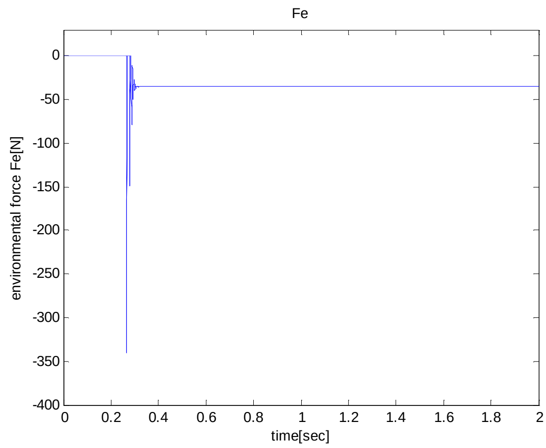
Fig. 3 1DOF simple robot manipulator for a simulation

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 제어기만으로의 시뮬레이션 결과를 Fig. 4 에 도시하였다. Fig. 3b 에서, 충돌시의 충돌 힘은 최고 약 -340[N]이 발생한다. 이는 일정하게 유지하려는 값 약 -40[N]보다 약 8.5 배에 달한다.

그러나 본 논문에서 제안하는 방법을 사용하여 ε=0.001[m], δ=0.05[m]로 설정하여 같은 조건에서 시뮬레이션을 수행하면, Fig. 4(a)에서, 0.2~0.4 초 동안 desired position 이 5.2 에서 (5+0.05)로 강제적으로 변환되어, 벽과 로봇의 충돌시 Fig. 4(b)와 같이 약 -70[N]의 접촉힘을 보임으로서, 기존의 방법을 사용하는 것보다 충돌시 약 4.9 배 작은 힘을 받음을 알 수 있다. 이로서 로봇이 기존의 방법보다 더 작은 충격량을 받게 됨을 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.

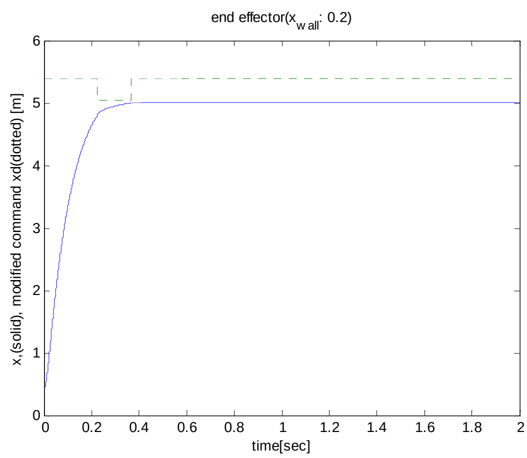


(a) end effector trajectory(dotted: desired position)

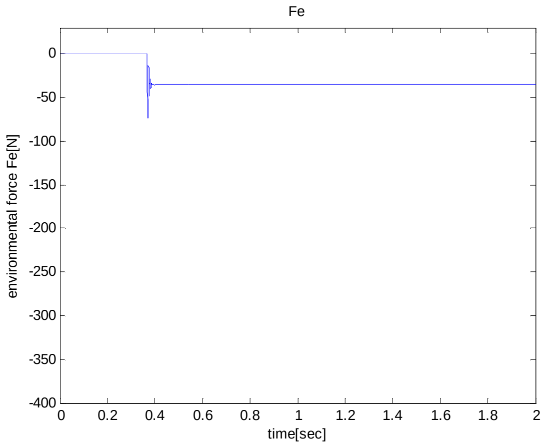


(b) contact force

Fig. 4 simulation result using conventional impedance control



(a) end effector trajectory(dotted: modified desired position)



(b) contact force

Fig. 5 simulation result using impedance control combined with the proposed method

5. 결 론

본 연구에서는 로봇 매니퓰레이터가 환경과 충돌 시 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 단단한 환경에 대하여 시뮬레이션을 수행하였다. 향후 과제로 충돌지점 근방 지역의 설정과 효율적인 목표값 변환 방법에 대한 연구가 필요할 것으로 보이며, 이의 실험을 통한 검증이 필요할 것으로 보인다.

참고문헌

(1) Luh, J. Y. S., 1984, “A Scheme for Collision Avoidance with Minimum Distance Traveling for Industrial Robots”, Journal of Robotic System, Vol. 1, No.1, 5-26

(2) Kim, Jinhyun, Chung, Wan Kyun, Youm, Youngil, 1999, “Impact Reduction for Unknown Environment Using Kinematic Reduncdancy”, Proc. Of Korea Automatic Control Conference, pp. E25-E28

(3) Lee E., Park, J., Chang, P. H., Schrader, C. B., June, 2003, “Hybrid Impedance/Time-Delay Control from Free Space to Constrained Motion”, Proc. of the American Control Conference, pp. 2132-2137

(4) Lee E., Park J., Loparo K. A., et al, June, 2003, “Bang-Bang Impact Control Using Hybrid Impedance/Time-Delay Control”, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 8, No. 2, pp. 272-277

(5) Park, Jong H., Song J. H., Cho H. C., Dec., 2000, “Impedance Modulation for a Teleoperator Using Distance Measurement”, Proc. of International Conf. on Control Automation, Robotics and Vision(ICARCV),

(6) Dubey, R. V., Chan, T. F., Everett, S. E., Feb., 1997, “Variable Damping Impedance Control of a Bilateral Telerobotic System”, IEEE Control Systems Magazine, Vol. 17, Issue 1, pp37-45

(7) Salcudean, S. E., Hashtrudi-Zaad, K., et al, Dec., 1999, “Bilateral Matched-Impedance Teleoperation with Application to Excavator Control”, IEEE Control Systems Magazine, Vol. 19, No. 6, pp. 29~37

(8) Colgate J.E., Aug., 1993, “Robust Impedance Shaping Telemanipulation”, IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 9, No. 4, pp. 374-384

(9) Zheng, Y. F., Hemani, H., 1985, “Mathematical Modeling of a Robot collision with Its Environment”, Journal of Robotic Systems, Vol.2, pp.289-307

(10) Asada, H., Slotine, J. J., 1986, “Robot Analysis and Control”, John Wiley & Sons, Inc., pp 108-110

(11) Bedford, A., Fowler, W., 2002, “Engineering Mechanics Dynamics”, Prentice Hall, pp.419-423

(12) Volpe, R., Khosla P., April, 1991, “Experimental Verification for a Strategy for Impact Control”, Proc. of IEEE International Conf. on Robotics and Automation, pp. 1854-1860

(13) Marth G.T., Tarn G.T., Bejczy A.K., 1994, “An Event Based Approach to Impact Control: Theory and Experiments”, Proc. of IEEE Int. Conf. of Robotics and Automation, pp. 918-923