

로봇接觸力の 微分 피이드백제어 (실험적 검토)

*김 영 탁
중앙대학교 기계설계학과

이 종 원, 권 영 웅
중앙대학교 기계공학과

Derivative Feedback Control of Robot Contact Force (Experimental Investigation)

*Young-Tark Kim
Dept. of Mechanical Design & Production Eng.
Chung-Ang University

Chong-Won Lee and Young-Kwoong Kwon
Dept. of Mechanical Eng.
Chung-Ang University

ABSTRACT

On force control of robot, the transient response of the force is as important as the steady state value. We analyze the force for an 1 d.o.f. model. Based on the analysis, we find out a desirable condition of the control system parameters for stability of the force. We propose a force rate feedback control for implementation. Through experiments we show that the force can be controlled stably for an arbitrary environment.

1. 서론

부품 조립작업이나 그라인더작업 등을 수행할 때에는 부품과 공구간의 접촉력의 제어가 작업을 성공으로 이끄는 유용한 한 수단이다.¹⁾ 따라서, 로봇으로 하여금 이와 같은 작업을 수행하도록 할 때에도 로봇과 작업 대상간의 접촉력을 제어하는 것이 문제 해결의 바람직한 한 가지 방법이라 할 수 있다. 로봇의 접촉력을 제어할 때에는 어떠한 수단을 이용하는 접촉력을 계속하고 그것을 피이드백 시키는 것이 일반적이다. 최근 이와 관련된 연구가 눈부신 발전을 보이고 있다. 그 중에서도 Hogan에 의해 제안된 임피던스제어(Impedance Control)²⁾는 Hybrid제어³⁾에 비하여 Robust성이 뛰어나고⁴⁾ 보다 일반화된 제어방식으로써 관심을 모으고 있으며 그 구체적인 실현 방법이나 응용에도 많이 발표되었다.^{5)~7)}

임피던스제어에서는 로봇의 단말효과기(End-Effector)가外力에 대해서 바람직한 거동을 하도록 제어된다. 즉 外力을 로봇의 입력으로 간주하고 그 입력에 대해서 적당한 임피던스를 갖도록 액츄에이터의 입력이 계산되거나 제어계의 파라미터가 조정된다. 그러나 로봇이 작업대상과 접촉하는 순간부터 접촉력은 입력으로 간주되기보다는 출력으로 간주되어야 한다. 이때 제어계의 출력인 접촉력은 작업대상의 성질(강성, 감쇠계수등)에 크게 좌우된다. 따라서 접촉력을 안정하게 제어하기 위해서는 작업대상의 성질을 고려한 임피던스의 설정이 필요하다. 더우기 작업대상의 성질이 예상과 다를 때에도 접촉력은 안정하게 제어되어야 한다.

본 연구에서는 작업대상을 포함한 1자유도의 모델을 이용하여 로봇과 작업대상간에 발생하는 접촉력을 해석하고 이 결과에 의해서 접촉력을 안정하게 제어하기 위한 파라미터의 설정조건을 찾아낸다. 그리고 이 조건에 상응하는 제어계의 구체적인 실현수단으로서 접촉력의 미분 피이드백 방법을 제안한다.

2. 로봇이 작업대상과 접할 때의 接觸力

Fig.1은 1자유도의 로봇이 작업대상과 접할 때의 모델을 나타낸다. 여기서 m 은 로봇의 질량, k_0 는 작업대상의 강성을 x , x_0 는 평형점으로부터의 로봇과 작업대상의 변위를 각각 나타낸다. 이 모델은 아암(Arm)기구부의 마찰과 컴플라이언스를 무시한 모델이다.

이와같은 로봇에 Fig.2와 같은 위치의 서어보계가 구성되었다고 하자. 그림중의 K_p , K_v 는 각각 위치와 속도의 피이드백 게인을, K_A 는 앰프를 포함한 액츄에이터의 게인을 나타낸다. 이 로봇의 컴플라이언스는

$$\frac{X(s)}{F_e(s)} = -\frac{1}{ms^2 + K_v k_A s + K_p k_A} \quad (1)$$

으로 표시된다. 문헌 2)에서는 이 역수를 임피던스라고 부르고 있다. 식(1)은 Fig.2의 x_d 를 0으로 하고 또한 F_0 를 단순히 로봇에 가한 外力으로 볼 때의 $X(s)$ 와 $F_0(s)$ 의 비이다.

또한 로봇이 작업대상에 접촉할 때에 작업대상간에 발생하는 힘 F_c 를 구하면

$$F_c(s) = \frac{k_e K_p k_A}{ms^2 + K_v k_A s + (K_p k_A + k_e)} X_d(s) - \frac{k_e (ms^2 + K_v k_A s + K_p k_A)}{ms^2 + K_v k_A s + (K_p k_A + k_e)} X_e(s) \quad (2)$$

가 되고 이 식으로부터 접촉력과 임피던스의 관계를 알 수 있다. 그리고 작업대상의 강성 k_0 가 본모에 포함되어 일종의 피이드백 게인으로 작용하고 있는 것을 알 수 있다.

위의 식에서 두개의 입력 $x_d(s)$, $x_0(s)$ 에 대하여 발생하는 각각의 힘은 전달함수의 본모가 같기 때문에 그 동적인 거동이 같다. 본 논문에서는 $x_d(s)$ 에 대하여 발생하는 접촉력을 중심으로 화제를 전개시키고자 한다. 입력 x_d 에 대한 접촉력을 $F_{xd}(s)$ 라고 하면

$$F_{xd}(s) = \frac{k_e K_p k_A}{ms^2 + K_v k_A s + (K_p k_A + k_e)} X_d(s) \quad (3)$$

이 된다. 여기서 서어보 강성 $K_p k_A$ 에 대한 작업대상의 강성 k_0 의 비를

$$\alpha = \frac{k_e}{K_p k_A} \quad (4)$$

로 놓고 식(3)을 正規化하면

$$F_{xd}(s) = \frac{k_e \omega_{np}^2}{s^2 + 2\zeta_p \omega_{np} s + \omega_{np}^2 (1 + \alpha)} X_d(s) \quad (5)$$

$$\frac{F_{xd}(S)}{K_p k_A} = \frac{\alpha}{S^2 + 2\zeta_p S + (1 + \alpha)} X_d(S) \quad (6)$$

이 된다. 여기서 ζ_p , ω_{np} , S 는

$$\zeta_p = \frac{K_v \sqrt{k_A}}{2\sqrt{mK_p}} \quad \omega_{np} = \sqrt{\frac{K_p k_A}{m}} \quad S = \frac{s}{\omega_{np}}$$

이다.

이때 ζ_p 는 α 가 0일 때(로봇트가 자유공간중을 움직일 때)의 계의 감쇠비이고, K_v 는 감쇠비 ζ_p 를 실현하기 위한 속도의 피이드백 게인이다. 로봇트가 작업대상과 접촉하면 α 값은 $\alpha \gg 1$ 로 되는 것이 일반적이기 때문에 계의 감쇠비는 급격히 저하한다. 이때 계의 감쇠비 ζ 는 다음과 같다.

$$\zeta = \frac{\zeta_p}{\sqrt{1 + \alpha}} \quad (7)$$

또한 고유진동수 ω_n 은

$$\omega_n = \omega_{np} \sqrt{1 + \alpha} \quad (8)$$

가 된다.

3. 考 察

입력으로서 step 狀의 x_d 를 주어 식(6)의 응답을 구해보면 Fig.3과 같이 된다. Fig.3은 식(6)에서 $\zeta_p=0.707$ 일때 강성비 $\alpha (=k_o/K_p k_A)$ 와 접촉력의 관계를 표시한 것이다. 이 그림에서 $K_p k_A$ 를 定數로 하았기 때문에 작업대상의 강성이 접촉력에 미치는 영향을 알 수 있다. 즉 로봇트와 작업대상간에 발생한 접촉력이 작업대상의 性質에 의해 크게 변화하는 것을 알 수 있다. 따라서 어떤 원하는 접촉력을 작업대상에게 가하려고 할 때 작업대상의 성질을 대강 예상해서 로봇트의 임피던스를 설정하였다면 실제 작업대상의 강성이 예상과 다른 경우 접촉력의 정적인 크기와 동적인 거동이 목적과는 크게 벗어난다.

작업의 진행중에 있어서 접촉력은 그 정적인 크기도 중요하지만 동적인 거동이 중요한 경우도 매우 많다. 예를 들어 고속작업의 경우는 접촉력의 동적인 거동이 작업성태의 중요한 열쇠가 되고 또 연마작업 등에서는 접촉력의 동적인 거동이 가공면의 질을 결정하기 때문에 작업대상의 강성에 의한 접촉력의 동적 거동이 급격히 변화하는 것은 바람직 하지 못하다. 다음 절에서는 작업대상의 다이내믹스에 상관없이 안정한 접촉력의 제어가 가능한 제어계의 구성에 관하여 논한다.

4. 接 觸 力 의 미 분 피 이 드 백

작업대상의 성질에 관계없이 접촉력의 안정된 제어가 필요함을 앞 절에서 설명하였다. 그 방법의 하나로 작업대상의 성질에 적응하여 원하는 임피던스를 계산해가는 방법을 생각할 수 있다. 즉 작업대상의 강성에 적응하여 원하는 임피던스를 계산하고 거기에 따라서 액튜에이터의 입력을 변화시키는가 위치 혹은 속도의 피이드백 계인을 다음과 같이 적용 시켜가는 방법이다.

$$K_p'' \Rightarrow \frac{K_p}{1 + \alpha} \quad (9)$$

$$K_v' \Rightarrow K_v \sqrt{1 + \alpha} \quad (10)$$

이 방법에서는 α 값 즉 작업대상의 성질을 정확히 알 필요가 있다. 그러나 실제에 불특정한 작업대상의 강성이나 감쇠계수 등을 미리 안다는 것은 거의 불가능하다. 본 연구에서는 작업대상의 동특성에 대한 정보를 필요로 하지 않는 간단한 방법을 제안한다. 즉 접촉력의 미분 피이드백 제어이다. Barsky¹⁰⁾는 로봇트 Gripper의 陽(Explicit) 힘제어에 접촉력신호의 미분을 이용하여 높은 성능을 얻고 있다. Barsky는 Gripper에 PVDF Piezo-electric sensor를 설치하여 접촉력의 미분신호를 얻어냈다. 이 신호를 이용하여 접촉력의 PD제어를 행하였다.

Fig.4에 본 논문에서 제안한 제어방식을 나타낸다. 그림중의 K_{fd} 는 접촉력의 미분 피이드백 계인을 나타낸다. 접촉력의 미분 피이드백을 행함으로써 식(3)은 다음과 같이 된다.

$$F_{xd}(s) = \frac{k_c K_p k_A}{ms^2 + (K_v k_A + K_{fd} k_c k_A)s + (K_p k_A + k_c)} \bar{X}_d(s) \quad (11)$$

이 식을 正規化하면 다음 식이 된다.

$$F_{xd}(s) = \frac{k_c \omega_{np}^2}{s^2 + 2\zeta^* \omega_n s + \omega_n^2} X_d(s) \quad (12)$$

여기서 ω_n 은

$$\omega_n = \omega_{np} \sqrt{1 + \alpha} \quad (13)$$

이다.

식(11)에서 만약 분모의 제2번째 항의 계수를

$$K_v + K_{fd} k_c = K_v \sqrt{1 + \alpha} \quad (14)$$

가 되도록 할 수 있다면

$$2\zeta^* \omega_n = \frac{K_v K_A \sqrt{1 + \alpha}}{m} \quad (15)$$

가 된다. 따라서 ζ^* 는

$$\zeta^* = \zeta_p \quad (16)$$

가 되고 작업대상의 강성과 무관한 감쇠비를 얻을 수 있게 된다. 즉 식(15)의 조건이 만족되도록 접촉력신호의 미분 피이드백 계인 K_{fd} 를 설정하면 응답속도는 변하더라도 안정성은 작업대상의 강성에 무관하게 된다.

그런데 식(15)의 조건을 만족하게 하기 위한 K_{fd} 를 실현하는 데는 다음과 같은 문제점이 있다. 즉, 이 조건을 만족시키기 위해서는 접촉력신호의 미분 피이드백 계인을

$$K_{fd} = \frac{K_v \sqrt{1 + \alpha} - K_v}{k_c} \quad (17)$$

가 되게 설정해야 하는데 작업대상의 강성 k_o 를 알지 않으면 안된다. 그래서 본 연구에서는

$$K_v + K_{fd} k_c = K_v (1 + \alpha) \quad (18)$$

가 되도록 K_{fd} 를 설정할 것을 제안한다. 이 때는 K_{fd} 를

$$K_{fd} = \frac{K_v}{K_p k_A} \quad (19)$$

로 하면 되기 때문에 작업대상의 강성을 알 필요가 없게 된다. 단지 이 경우 ζ^* 는

$$\zeta^* = \zeta_p \sqrt{1 + \alpha} \quad (20)$$

가 되어서 ζ *는 작업대상의 강성에 의존하게 된다. 그러나 종래의 방법에서는 작업대상의 강성이 크면 계의 감쇠비가 작아지고 불안정해지는데 반해 이 경우에는 작업대상의 강성이 높을수록 안정성이 높게 된다. 또 일반적인 계에서는 감쇠비가 높게 되면 응답속도가 늦어지는데 반해 이 경우에는 ω_n 이 식(13)과 같게 되므로 응답속도도 빨라지게 되어 문제가 되지 않는다. 이 같은 제어계에 있어서 접촉력 F_0 는

$$\frac{F_0(s)}{K_p K_A} = \frac{\alpha}{S^2 + 2\zeta_p(1+\alpha)S + (1+\alpha)} \quad (21)$$

과 같이 되고 Step 應答를 구해보면 Fig.5와 같이 된다. Fig.3 과 비교해 보면 본 논문에서 제안된 방법의 효과를 알 수 있다. 즉 α 가 커져도 안정성은 매우 좋다.

5. 實驗

이節에서는 접촉력의 미분 피드백 제어를 실시한 실험결과를 제시하려 한다. 실험에는 Fig.6에 나타난 장치를 이용하였다. 직결구동(Direct-drive)방식의 관절이기 때문에 구조는 Fig.1의 모델과 거의 일치한다. 이 관절의 축에는 길이 30cm의 알루미늄의 아암을 설치함과 동시에 아암의先端 가까이에는 스트레인 게이지를 부착했다. 이 스트레인 게이지를 접촉력 센서로서 사용한다. 이 때 접촉력 센서의 노이즈(Noise)를 가능한 한 감소시키기 위해 銅箔으로 shield)시킨 抗磁性 스트레인 게이지를 이용했다.

이 시스템에 Fig.2에 나타난 위치제어계를 구성하였다. 또한 아암의 정적 컴플라이언스가 0.0392 rad/Nm (아암先端에서의 等價直線剛性=283 N/m), 아암이 자유공간을 움직일 때의 감쇠비가 0.707이 되도록 제어계의 파라미터(임피던스)를 설정했다. 즉, 작업대상의 강성을 ζ 로 예상하여 ζ 의 파라미터를 설정하고 실제는 임의의 강성을 가진 작업대상에 접하는 경우의 접촉력의 안정성을 조사해 본다.

Fig.7은 자유공간 중에서의 스텝(step) 응답인데 감쇠비가 약 0.707인 것을 알 수 있다. 다음은 아암의先端을 강성이 약 1600N/m의 스펀지의 표면을 가진 작업대상에 가볍게 접촉시켜 놓고 관절에 스텝狀의 위치의 入力を 附加했다. 이 때 발생한 접촉력을 작업대상 側에 설치한 스트레인 게이지에 의해 관측해 보았다. 접촉력을 작업대상 側의 스트레인 게이지에 의해 관측한 이유는 아암 側의 센서 보다는 순수한 접촉력(아암의 관성력등을 제외한)의 관측이 가능하기 때문이다.

Fig.8은 접촉력의 미분 피드백을 행하지 않은 경우의 응답으로서, ζ 가 0.27로 매우 작고 오버슈트는 70%에 달했다(이 때 $\alpha = 5.65$ 이었다). 그러나 접촉력의 미분 피드백을 행함으로써 Fig.9와 같이 오버슈트가 거의 없고, 整定時間도 짧은 응답을 나타냈다. 이 때 접촉력의 피드백 계인은 식(19)에 의해 設定되었다. 또한 접촉력의 미분신호는 아암의先端 부근의 스트레인 게이지에 의해 검출된 신호를 疑似미분하여 얻었으며, 疑似미분을 위해서는 간단한 OP 앰프를 이용하였다.

다음에는 충돌에 대한 실험 결과를 보인다. 아암先端이 작업대상으로 부터 약 1 cm 떨어져 있도록 한 상태로 부터 관절에 스텝狀의 위치입력을 가하여 보았다. 그때의 접촉력을 관측한 것이 Fig.10,11인데 접촉력의 미분 피드백을 행한 Fig.11의 경우가 오버슈트나 안정성 면에서 매우 우수한 응답을 나타내는 것을 알 수 있다.

마지막으로 스펀지보다 강성이 높은 고무, 목재, 알루미늄 등의 작업대상에 대하여 같은 실험을 해 보았다. 그런데 접촉력의 미분 피드백을 행한 쪽이 오히려 불안정하게 되었다. 이 원인은 접촉력 센서의 필터에 있는 것으로 생각된다. 본 실험에서는 접촉력 센서의 잡음(Noise) 방지를 위하여 미분기의 前段에 遮斷周波數 40Hz의 필터(Filter)를 사용했다. 따라서 작업대상이 스펀지 일때는 접촉력 信號의 주파수가 약

33Hz로 필터를 通過할 수 있었다. 그러나 작업대상의 강성이 클 때에는 접촉력이 고무와 성분을 포함하게 되고 이 실험에서는 그 고무와 성분이 여과되어 불안정을 초래한 것으로 생각된다. 본 연구에서 제안된 방법의 實用化를 위해서는 접촉력의 미분 신호를 용이하게 얻을 수 있는 고성능의 센서의 개발이 필요하다고 생각된다.

6. 結論

로봇이 작업 대상과 접촉할 때의 접촉력에 대해 고찰했다. 1자유도의 모델을 이용하여 접촉력이 작업대상의 강성에 크게 의존함을 보이고, 임의의 강성을 가지는 작업대상에 대해서도 항상 접촉력이 안정하게 제어될 수 있기 위한 제어계의 파라미터 설정조건을 제시했다. 그 구체적 실험 방법으로 접촉력의 미분 피드백 방법을 제안했고, 작업대상의 강성에 대한 정보가 없이도 접촉력이 안정하게 제어될 수 있기 위한 피드백 이득(gain)의 설정조건을 제시했다. 그리고 직결구동 방식의 1자유도 최전관절을 이용한 실험에 의해 제안한 방법의 유효성을 검증했다. 그 결과 제안한 방법이 접촉력의 안정화에 매우 효과적임을 알 수 있었다.

參考文獻

- [1] Whitney, D.E., "Historical Perspective and State of the Art in Robot Force Control", Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.262-268, 1985.
- [2] Hogan, N., "Impedance control: An approach to manipulator: Part I-III", Transactions of the ASME, Journal of Dynamic System, Measurement and Control, Vol.107, pp.1-24, 1985.
- [3] Raibert, M.H. and J.J. Craig, "Hybrid Position/Force Control of Manipulator", Transactions of the ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Vol.102, pp.126-133, 1981.
- [4] Asada, H. and Slotine, J.J.E., "Robot Analysis and Control", John Wiley, Chapter 3, 1986.
- [5] Hogan, N., "Stable execution of contact tasks using impedance control", Proceedings of the 1987 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Vol.2, pp.1047-54, 1987.
- [6] Kazerooni, H., "Automated robotic deburring using impedance control", IEEE Control Syst. Mag.(USA), Vol.8, No.1, pp.21-5, 1988.
- [7] Anderson, R.J. and Spong, M.W., "Hybrid impedance control of robotic manipulators", IEEE J. Robot. Autom. (USA), Vol.4, No.5, pp.549-56, 1988.
- [8] Kosuge, K., Furuta, K. and Yokoyama, T., "Virtual internal model following control system application to mechanical impedance control", Trans. Soc. Instrum. Control Eng. (Japan), Vol.24, No.1, pp.55-62, 1988.
- [9] Goldenberg, A.A., "Implementation of force and impedance control in robot manipulators", Proceedings of the 1988 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Vol.3, pp.1626-32, 1988.
- [10] Barsky, M.F., Lindner, D.K. and Claus, R.O., "Robot gripper control system demonstrating PVDF piezoelectric sensors", Proceedings of the 1986 IEEE Ultrasonics Symposium, Vol.1 pp.545-548, 1986.

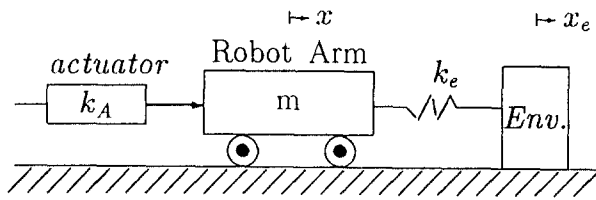


그림1 外部와 접촉하고 있는 로봇의 모델
Fig.1 Model of constrained robot

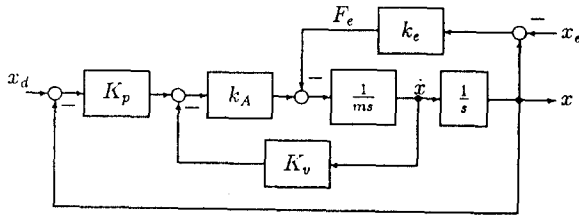


그림2 外部와 접촉하고 있는 로봇의 블록선도
Fig.2 Block diagram of constrained robot

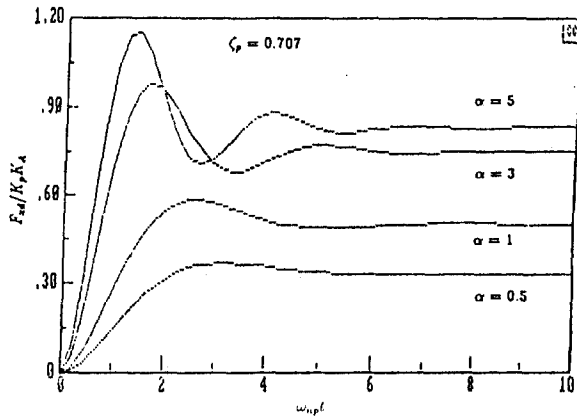


그림3 위치의 스텝입력에 대한 접촉력
Fig.3 Force for the positional step input

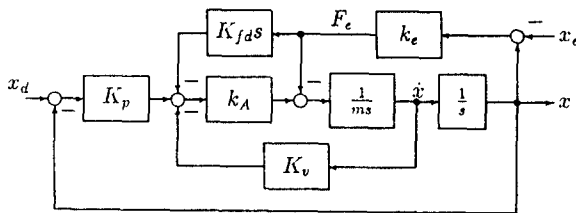


그림4 접촉력의 미분 피드백 무우프를 가진
로봇의 블록선도
Fig.4 Block diagram of constrained robot
with force rate feedback

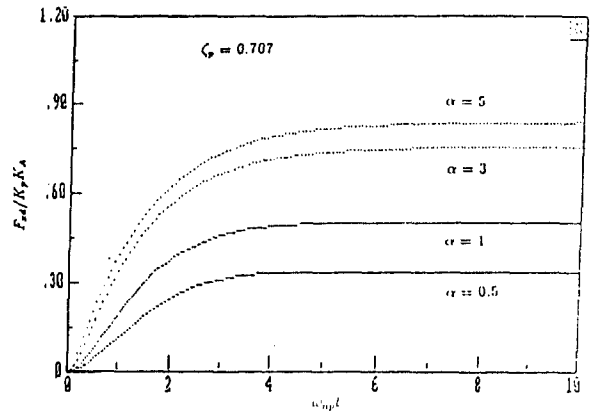


그림5 접촉력의 미분 피드백 무우프를
가진 로봇의 접촉력
Fig.5 Force for the positional step input
on system with force rate feedback

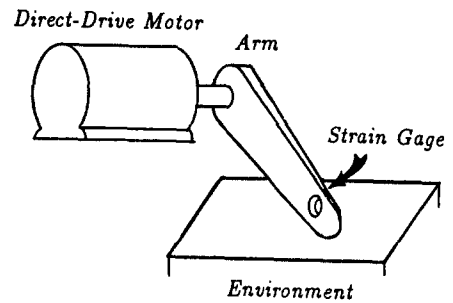


그림6 실험장치
Fig.6 Experimental setup

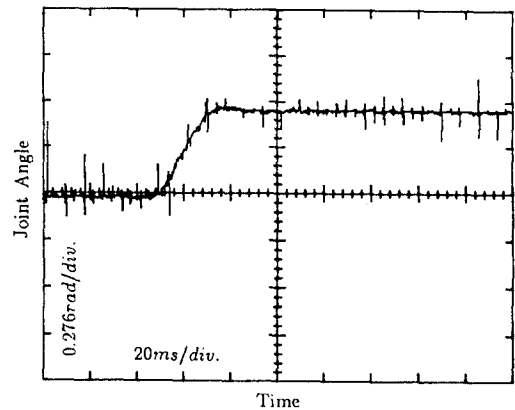


그림7 자유공간 중에서의 위치 응답
Fig.7 Positional reponse in free space

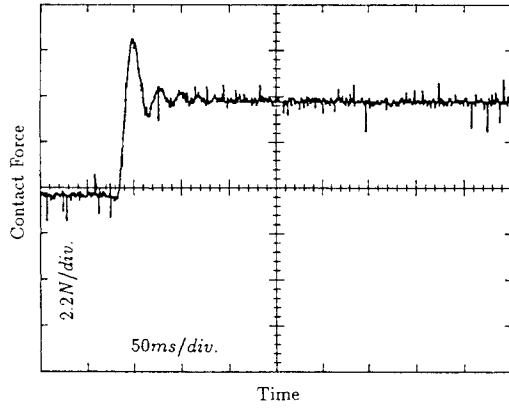


그림8 접촉력의 미분 피드백 루우프를 가지지 않은 로봇트의 접촉력
 Fig.8 Force for the positional step input without force rate feedback

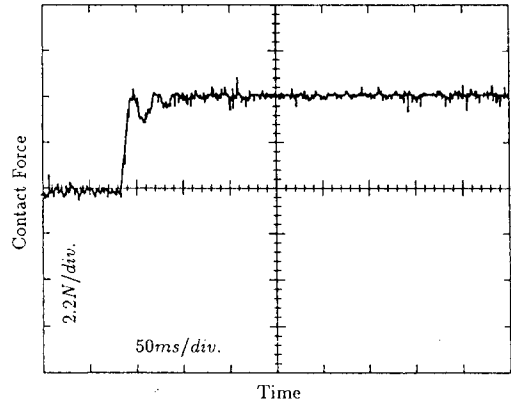


그림11 접촉력의 미분 피드백 루우프를 가진 로봇트에 대한 충돌시험
 Fig.11 Collision test for the system with force rate feedback

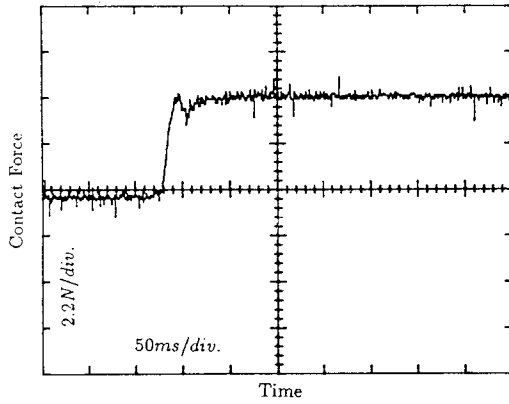


그림9 접촉력의 미분 피드백 루우프를 가진 로봇트의 접촉력
 Fig.9 Force for the positional step input with force rate feedback

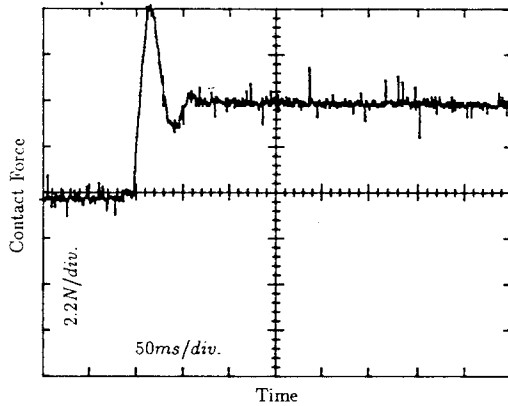


그림10 접촉력의 미분 피드백 루우프를 가지지 않은 로봇트에 대한 충돌시험
 Fig.10 Collision test for the system without force rate feedback