

## 비선형 보상기와 피드포워드 제어에 의한 로봇의 위치/힘 제어

황 용 연\*

**Position/Force Control of a Robot by a Nonlinear Compensator and Feedforward Control**

Y. Y. Hwang

**Key words :** Robotics(로봇공학), Position/Force Control(위치/힘 제어), Nonlinear Compensator(비선형 보상기), Feedforward Control(피드포워드 제어)

**Abstract**

This paper deals with a hybrid position/force control of a robot which is moving on the constrained object with constant force. The proposed controller is composed of a position and force controller. The position controller has a nonlinear compensator which is based on the dynamic robot model, and the force controller is attached by feedforward element. A direct drive robot with hard nonlinearity which is controlled by the proposed algorithm has moved on the constrained object with a high stiffness and low stiffness. The results show that the proposed controller has more vibration suppression effects, which is occurred to the constrained object with a high stiffness, than a existing feedback controller, and accurate force control can be obtained by comparatively a small feedback gain.

## 1. 서 론

인간은 손을 사용하여 물체를 만지거나 손에서 느끼는 힘을 조절하여, 물체의 특성을 파악하거나, 글을 쓴다든지, 유리창을 닦는 등 여러 가지 기능을 발휘할 수 있다. 이와 같이 산업용 로봇에도

힘을 감지 할 수 있는 기능을 부여하므로써 지금까지 불가능했던 여러 가지 일들을 가능하게 할 수 있다. 특히 최근에는 로봇을 이용한 조립, 연마, 면 따기 작업 등 마무리 작업에 대한 자동화의 필요성이 높아지고 있으며, 이에 대한 연구가 끊임 없이 계속되고 있다. 이러한 작업은 로봇이 보유

\* 부경대학교 공과대학 제어계측공학과 (원고접수일 : 97년 10월)

한 공구를 사용하여 물체나 주위 환경에 대한 접촉힘을 적절하게 제어할 수 있는 능력이 갖추어졌을 때 가능하다.

로봇을 이용한 힘 제어에 대한 대표적인 연구는 대상물과의 직접 접촉에 의해 일정한 힘과 위치를 제어하는 하이브리드 제어(Hybrid control)<sup>1)~4)</sup>와 말단 효과기(End-effector)를 물체에 접촉시킨 상태에서 말단 효과기의 위치나 접촉힘에 대한 저항력을 유연하게 제어하는 임피던스 제어(Impedance control)<sup>5),6)</sup> 혹은 컴플라이언스 제어(Compliance control)<sup>7),8)</sup>가 있다. 하이브리드 제어는 구속면 혹은 대상물과 접촉이 일어났을 때, 위치 제어와 힘 제어가 서로 간섭하지 않도록, 로봇이 구속되는 방향으로 힘 제어를 하고, 구속되지 않는 방향으로 위치 제어를 행하는 것으로서, 힘에 대한 정보를 직접 로봇의 제어량으로 하는 직접적인 힘 제어방식이라 할 수 있다. 이러한 하이브리드 제어에 관한 연구는 하이브리드 제어의 기초를 확립한 연구<sup>1)</sup>를 비롯하여, 로봇의 비선형항에 대한 계산량을 고려하여 샘플링 주기를 조절한 연구<sup>2)</sup>, 대상물의 특성 변화에 따른 강인(Robust) 제어에 관한 연구<sup>3)</sup>, 수평다관절 로봇을 이용한 동역학적 하이브리드 제어에 관한 연구<sup>4)</sup> 등 실제의 산업용 로봇에 적용시키기 위한 많은 연구가 계속되고 있다.

로봇의 힘 제어는 로봇 선단에 장착된 힘 센서에서 측정되는 힘 정보에 의해 제어 입력이 계산되는 경우가 보통이다. 만약, 로봇이 강성이 큰 작업 환경과 접촉하는 경우, 동력 전달장치인 감속기에 의한 강성을 무시할 수가 없다. 이 경우, 정밀한 힘 제어를 위해서는 로봇을 구동하는 액추에이터와 힘 센서사이의 동특성을 고려할 필요가 있다. 이러한 관점에서 볼 때, 감속기를 부착한 기존의 로봇에 비해, 직접 구동(Direct drive ; 이하 DD)로봇은 모터와 링크사이의 감속기와 같은 별도의 동력 전달기구 없이 직접 링크를 구동시키기 때문에, 기계적 강성이 높으므로 고정밀도의 힘 제어에 유리하다고 할 수 있다<sup>9),10)</sup>. 그러나, DD로봇은 자세나 운동에 의한 링크사이의 간섭과 중력, 마찰력 등의 비선형 특성에 대한 영향을 강하게 받기 때문에 DD로봇의 정확한 운동 특성을 파

악하여, 이러한 비선형 특성을 보상해 줄 필요가 있다.

이 논문에서는 피드백 제어기에 동역학적 모델에 근거를 둔 비선형 보상기를 첨가시킨 위치 제어기와 피드백 제어에 피드포워드(Feedforward) 요소를 첨가시킨 힘 제어기로 구성된 하이브리드 제어기<sup>11)</sup>를 이용하여, 로봇 선단에서의 구속 접촉면에 대해 일정한 힘을 유지하면서 이동하는 위치/힘 제어를 제안하였다. 그리고, 제안한 알고리즘을 비선형성이 강한 DD로봇에 적용하여, 고강성 및 저강성 구속면에 대한 하이브리드 제어 실험을 통해, 기존의 다른 피드백 제어기와의 성능을 비교하였다.

## 2. 위치/힘 제어기의 구성

로봇을 이용한 하이브리드 위치/힘 제어기는 일반적으로 위치 제어기와 힘 제어기가 독립적으로 구성되어 있으며, 위치 보상함수와 힘 보상함수에서 각각 계산된 조작량을 가산하여, 최종적인 로봇의 조작량으로 이용한다. 로봇의 작업 공간은 접촉면에 의해 구속되는 공간과 구속되지 않는 공간으로 분류하여, 구속되는 공간으로는 힘 제어를 하고, 구속되지 않는 공간으로는 위치 제어를 한다.

이 논문에서 이용한 하이브리드 위치/힘 제어를 Fig.1에 나타낸다. 위치 및 힘에 대한 목표 제어량은 로봇 하단부를 기준으로 한 직교 좌표계로 주어지며,  $z$  는  $z$  변환,  $T$  는 샘플링 주기를 각각 나타낸다.

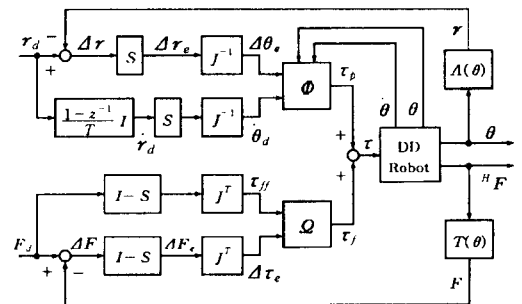


Fig. 1 Hybrid position/force control

직교 좌표계를 기준으로한 로봇의 선단 위치를  $r$ 이라 하면,  $r$ 은 운동학 함수  $A(\theta)$ 를 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$r = A(\theta) \quad (1)$$

힘 센서 좌표계를 기준으로한 구속면과의 접촉 힘  $F$ 를 좌표 변환행렬  $T(\theta)$ 에 의해 직각 좌표계로 변환하면 다음과 같다.

$$F = T(\theta)^T F_c \quad (2)$$

목표 위치  $r_d$ 와 실제 위치  $r$ 과의 오차  $\Delta r$ , 목표 접촉힘  $F_d$ 와 실제 접촉힘  $F$ 와의 오차  $\Delta F$ 는 다음과 같이 각각 정의한다.

$$\Delta r = r_d - r \quad (3)$$

$$\Delta F = F_d - F \quad (4)$$

직교 좌표계를 기준으로한 위치 및 힘에 대한 오차는 자코비안 행렬  $J$ 를 이용하여 관절 좌표계를 기준으로한 각도 변위  $\Delta\theta_e$  및 토크 변화량  $\Delta\tau_e$ 로 다음과 같이 각각 변환시킬 수 있다.

$$\Delta\theta_e = J^{-1} S \Delta r \quad (5)$$

$$\Delta\tau_e = J^T (I - S) \Delta F \quad (6)$$

여기서,  $S$ 는 위치 및 힘에 대한 자유도를 선택하는 행렬로서, 위치 자유도에 대해서는 1, 힘 자유도에 대해서는 0의 성분을 갖는 대각 행렬이다. 또한,  $I$ 는 단위행렬을 나타낸다.

목표 속도  $\dot{r}_d$  및 피드포워드 요소인 목표 접촉 힘  $F_d$ 에 대한 관절 좌표계로의 변환은 다음과 같다.

$$\dot{\theta}_d = J^{-1} S \dot{r}_d \quad (7)$$

$$\tau_{ff} = J^T (I - S) F_d \quad (8)$$

일반적으로 회전 관절을 갖는  $N$ 자유도 로봇의 운동 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$M(\theta) \ddot{\theta} + H(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta) + B \dot{\theta} + F_c(\theta) = \tau \quad (9)$$

여기서,  $\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta}$ 는 관절각도, 각속도, 각가속도( $N \times 1$ ),  $M(\theta)$ 는 관성 행렬( $N \times N$ ),  $H(\theta, \dot{\theta})$ 는 원심력 및 코리올리력 벡터( $N \times N$ ),  $G(\theta)$ 는 중력 벡터( $N$

$\times 1$ ),  $B$ 는 점성 계수( $N \times N$ ),  $F_c$ 는 마찰력 벡터( $N \times 1$ ),  $\tau$ 는 구동 토크 벡터( $N \times 1$ )이다.

Fig.1에서 위치 보상함수  $\Phi$ 는 Fig.2와 같이 PID제어에 비선형 보상기를 첨가한 형태로 구성되어 있다. 비선형 보상기는 관성 행렬을 미리 준비하여 관성에 대한 보상을 하고, 원심력, 중력 그리고 마찰력 등 비선형항에 의한 감쇠 요인에 대해서도 이들에 대한 보상을 로봇의 구동 토크로서 미리 덧붙여 놓는다. 그러므로, 위치 제어기의 출력을  $\tau_p$ 라하고, 다음과 같이 정의한다.

$$\tau_p = M(\theta) \{ K_{pp} \Delta\theta_e + K_{pi} \int \Delta\theta_e dt + K_{pd} (\dot{\theta}_d - \dot{\theta}) \} + H(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta) + B \dot{\theta} + F_c(\theta) \quad (10)$$

여기서,  $K_{pp}$ 는 위치 제어기의 비례게인,  $K_{pi}$ 는 적분게인, 그리고  $K_{pd}$ 는 미분게인이다.

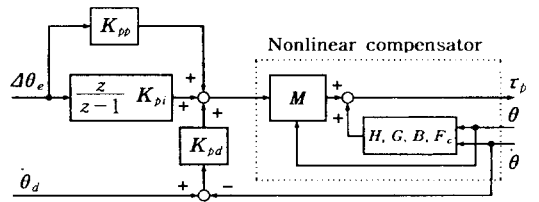


Fig. 2 Position controller

힘 보상함수  $\Omega$ 는 Fig.3과 같이 PI제어에 피드포워드 요소를 첨가시킨 것이며, 힘 제어기의 출력을  $\tau_f$ 라하고, 다음과 같이 정의한다.

$$\tau_f = K_{fp} \Delta\tau_e + K_{fi} \int \Delta\tau_e dt + K_{ff} \tau_{ff} \quad (11)$$

여기서,  $K_{fp}$ 는 힘 제어기의 비례게인,  $K_{fi}$ 는 적분게인, 그리고  $K_{ff}$ 는 피드포워드 게인이다.

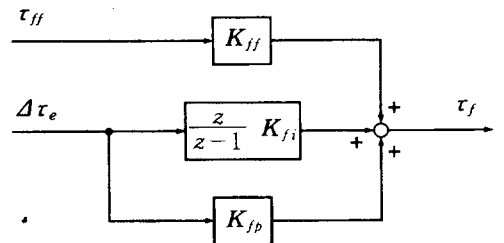


Fig. 3 Force controller

로봇의 조작량  $\tau$ 는 위치 제어기의 출력과 힘 제어기의 출력을 가산한 것으로 다음과 같이 정의한다.

$$\tau = \tau_r + \tau_f \quad (12)$$

### 3. 실험 장치

Fig.4는 Yokogawa precision(주)의 DM1045-B 인 DD모터 2대를 사용하여 제작한 평행링크 DD 로봇의 개략도이다. 로봇 선단에는 스트레인 게이지를 이용하여 제작한 2자유도 힘 센서가 부착되어 있다.

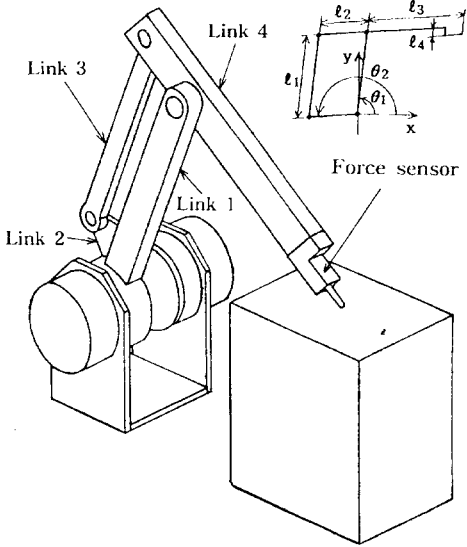


Fig. 4 DD robot with a force sensor

N자유도 로봇의 운동 방정식인 식 (9)를 Fig.4의 평행링크 로봇에 적용하면, 다음과 같은 2자유도 평행링크 DD로봇의 운동 방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & H_{12} \\ -H_{12} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1^2 \\ \dot{\theta}_2^2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} G_1 \\ G_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 & 0 \\ 0 & B_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} F_{c1} \\ F_{c2} \end{bmatrix} \quad (13)$$

식(13)에서  $M_{ij}$ ,  $H_{12}$ , 그리고  $G_i$  및  $F_{ci}(i=1,2, j=1,2)$ 의 내용은 다음과 같다.

$$M_{11} = I_1 + m_1 l_{c1}^2 + I_3 + m_3 l_{c3}^2 + m_4 l_1^2 + J_{m1} \quad (14)$$

$$M_{12} = M_{21} = (m_3 l_2 l_{c3} - m_4 l_1 l_{c4}) c_{1-2} \quad (15)$$

$$M_{22} = I_2 + m_2 l_{c2}^2 + I_4 + m_4 l_{c4}^2 + m_3 l_2^2 + J_{m2} \quad (16)$$

$$H_{12} = (m_4 l_1 l_{c4} - m_3 l_2 l_{c3}) s_{1-2} \quad (17)$$

$$G_1 = g c_1 (m_1 l_{c1} + m_3 l_{c3} + m_4 l_1) \quad (18)$$

$$G_2 = g c_2 (m_2 l_{c2} + m_3 l_2 - m_4 l_{c4}) \quad (19)$$

$$F_{c1} = f_{c1} \text{sgn}(\dot{\theta}_1) \quad (20)$$

$$F_{c2} = f_{c2} \text{sgn}(\dot{\theta}_2) \quad (21)$$

$$\text{sgn}(\dot{\theta}_i) = \begin{cases} 1 & \dot{\theta}_i > 0 \\ 0 & \dot{\theta}_i = 0 \\ -1 & \dot{\theta}_i < 0 \end{cases} \quad (22)$$

여기서,  $I_i$ 는  $i$ 번째 관절 축 주위의 관성 모멘트,  $J_{mi}$ 는  $i$ 번째 DD모터의 관성,  $m_i$ 는 링크  $i$ 의 질량,  $l_i$ 는 링크  $i$ 의 길이,  $l_{ci}$ 는 관절  $i$ 에서 링크 무게 중심까지의 길이,  $g$ 는 중력 가속도를 나타낸다. 그리고, 식의 간략화를 위해 정현, 여현을 각각  $s_i = \sin \theta_i$ ,  $c_i = \cos \theta_i$ ,  $s_{i-j} = \sin(\theta_i - \theta_j)$ ,  $c_{i-j} = \cos(\theta_i - \theta_j)$ 와 같이 표현하였다. 또한, Table 1에 DD로봇의 파라미터를 나타내었으며, 모터 관성  $J_{m1} = J_{m2} = 0.019[\text{Kg} \cdot \text{m}^2]$ , DD모터에 대한 특성시험 결과를 바탕으로 점성 계수  $B_1 = 0.27$ ,  $B_2 = 0.26$ , 마찰 계수  $f_{c1} = 0.70$ ,  $f_{c2} = 0.62$ 의 값을 이용하였다.

Table 1 Link parameters of the DD robot

| $i$ | $l_i[\text{m}]$ | $l_{ci}[\text{m}]$ | $m_i[\text{Kg}]$ | $I_i[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$ |
|-----|-----------------|--------------------|------------------|-----------------------------------|
| 1   | 0.400           | 0.084              | 1.160            | 0.0360                            |
| 2   | 0.200           | 0.058              | 0.807            | 0.0083                            |
| 3   | 0.545           | 0.200              | 0.504            | 0.0151                            |
| 4   | 0.062           | 0.059              | 0.700            | 0.0329                            |

식(1) ~ (8)의 각종 변수를 평행링크 DD로봇에 적용하여 다음과 같이 정의한다.

$$r = [r_x \quad r_y]^T \quad (23)$$

$$r_d = [r_{dx} \quad r_{dy}]^T \quad (24)$$

$$\theta = [\theta_1 \quad \theta_2]^T \quad (25)$$

$$\theta_d = [\theta_{d1} \quad \theta_{d2}]^T \quad (26)$$

$$F = [F_x \quad F_y]^T \quad (27)$$

$$F_d = [F_{dx} \quad F_{dy}]^T \quad (28)$$

$$A(\theta) = \begin{bmatrix} l_1 c_1 - l_3 c_2 - l_4 s_2 \\ l_1 s_1 - l_3 s_2 + l_4 c_2 \end{bmatrix} \quad (29)$$

$$T(\theta) = \begin{bmatrix} -c_2 & s_2 \\ -s_2 & -c_2 \end{bmatrix} \quad (30)$$

$$J = \begin{bmatrix} -l_1 s_1 & l_3 s_2 - l_4 c_2 \\ l_1 c_1 & -l_3 c_2 - l_4 s_2 \end{bmatrix} \quad (31)$$

$$S = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (32)$$

### 4. 실험

#### 4.1 제어 대상 및 실험 방법

제어 대상인 구속 접촉면은 강성의 비교를 위해 강철판(고강성)과 Mouse pad(저강성)를 이용하였다. 샘플링 주기는 5 [ms], 총 샘플링 수는 600 으로 하였다. 위치 제어기의 게인은  $K_{pp}=150, K_{pi}=10, K_{pd}=15$ 이며, 힘 제어기의 게인은 구속 접촉면이 고강성인 경우는  $K_{fp}=0.4, K_{fi}=0.3, K_{ff}=0.5$ 로 하였으며, 저강성인 경우는  $K_{fp}=0.6, K_{fi}=0.5, K_{ff}=0.6$ 으로 하였다.

하이브리드 제어에 들어가기 전의 초기동작은 로봇 선단을 구속면 근처로 이동시킨 후, y축 부의 방향으로 피드백 제어를 행하며 천천히 구속면을 향해 접근시킨다. 이 때 로봇 선단이 구속면에 접촉하여, 힘 센서로부터 검출되는 y축 방향의 접촉 힘  ${}^H F_y$ 를 식(2)를 이용하여 Fig.5에 나타낸 것처럼 로봇 하단부의 직교 좌표계로 변환시킨  $F_y$ 가 -2 [N]이 되면, 직교 좌표계를 기준으로 y축 부의 방향으로 일정한 힘을 유지하면서, x축 부의 방향을 따라 0.1 [m] 이동하는 하이브리드 제어 실험에 들어간다. Fig.6~Fig.13에 나타낸 실험 결과는 모두 초기동작을 끝낸 이후의 것이다. 또한, 실험 결과에 대한 성능 비교를 위하여, 힘 및 위치에 대한 평균 자승오차를 계산하여 저장한다.  $\overline{e_p^2}$  및  $\overline{e_f^2}$ 은 총 샘플링 수를  $N$ 이라 놓고, 다음과 같이 정의한다.

$$\overline{e_p^2} = \frac{\sum_{k=1}^N \{r_{dx}(k) - r_x(k)\}^2}{N} \quad (33)$$

$$\overline{e_f^2} = \frac{\sum_{k=1}^N \{F_{dy}(k) - F_y(k)\}^2}{N} \quad (34)$$

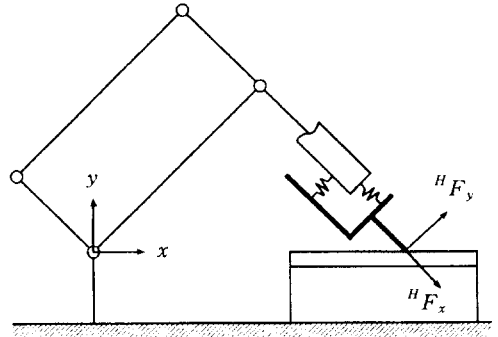


Fig. 5 Force sensor and constrained object

#### 4.2 실험 결과

실험에서는 힘 제어기의 구성에 역점을 두었으며, 위치 제어는 PID+비선형 보상기를 이용한 제어기로 고정하고, 힘 제어는 Table 2에 나타낸 것과 같이, PI+FF제어와 기존의 다른 피드백 제어와의 비교를 위해 PI제어( $K_{fp}=0.6, K_{fi}=0.4, K_{ff}=0$ ), 또한, FF요소에 대한 효과를 알아보기 위해, I제어( $K_{fp}=0, K_{fi}=0.6, K_{ff}=0$ ) 및 I+FF( $K_{fp}=0, K_{fi}=0.4, K_{ff}=0.5$ )제어를 각각 이용하여, 구속면에 대한 하이브리드 위치/힘 제어실험을 하였다.

Table 2 Experimental conditions

| Case   | Force controller | Constrained object |
|--------|------------------|--------------------|
| Case 1 | PI+FF            | Steel plate        |
| Case 2 | PI               | Steel plate        |
| Case 3 | I                | Steel plate        |
| Case 4 | I+FF             | Steel plate        |
| Case 5 | PI+FF            | Mouse Pad          |
| Case 6 | PI               | Mouse pad          |
| Case 7 | I                | Mouse Pad          |
| Case 8 | I+FF             | Mouse pad          |

Fig.6 ~Fig.9는 고강성인 강철판을 구속 접촉면으로 사용한 경우이며, 목표 위치에 대한 궤도 생성은 출발에서 정지까지 일정 속도  $v=0.033$  [m/s]를 이용한 경우이다.

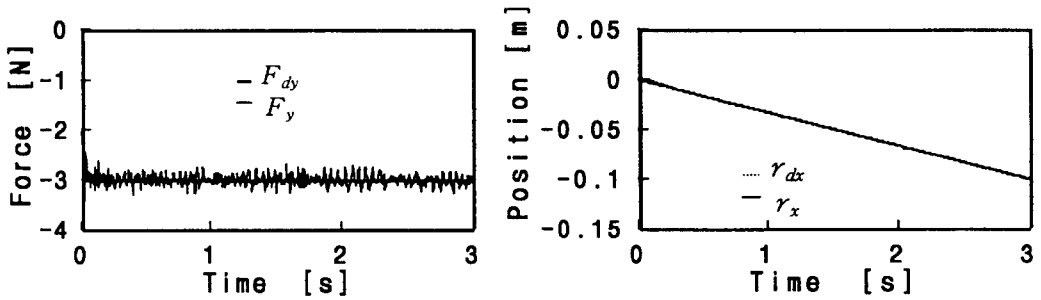


Fig. 6 Experimental results for case 1(PI+FF)

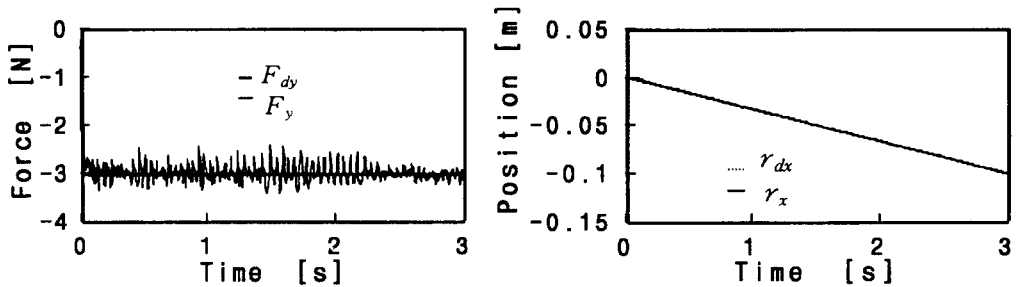


Fig. 7 Experimental results for case 2(PI)

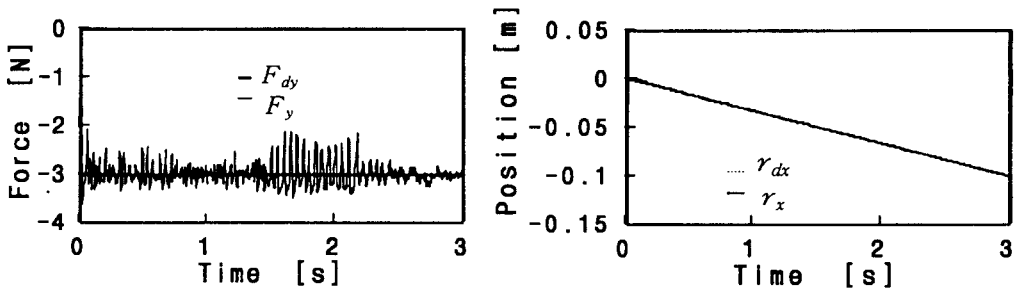


Fig. 8 Experimental results for case 3(I)

Fig.6(Case 1)은 위치 제어는 PID+비선형 보상기, 힘 제어는 PI+FF제어를 이용한 경우이다. 왼쪽 그림은 목표 접촉 힘  $F_{dy}$ 와 실제의 응답  $F_y$ 를 나타낸다. 구속면이 고강성이므로 진동 성분이 있으나, 목표 접촉힘  $-3$  [N]으로부터 최대  $0.2$  [N]범위 내에 있음을 알 수 있다. 오른쪽 그림은 목표 위치  $r_{dx}$ 와 실제의 응답  $r_x$ 를 나타내며, 초기 동작에

서 약간의 오차가 발생되나 전반적으로 목표 위치를 잘 추종하고 있음을 알 수 있다.

Fig.7(Case 2)은 PI제어에 의한 힘 제어를 이용한 경우이다. 힘 제어에 대한 응답을 보면, Case 1에 비해 목표 힘에 대한 오차가 두배이상 증가하여 진동성분이 크게 나타남을 알 수 있다. 위치 제어에 대한 응답은 Case 1과 비교할 때, 큰 차이 없

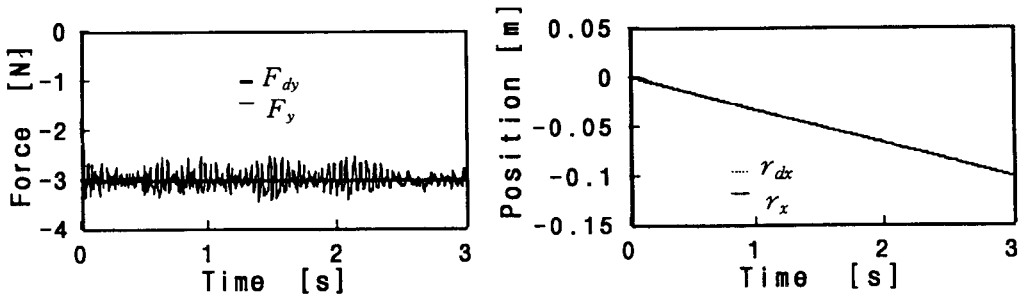


Fig. 9 Experimental results for case 4(I+FF)

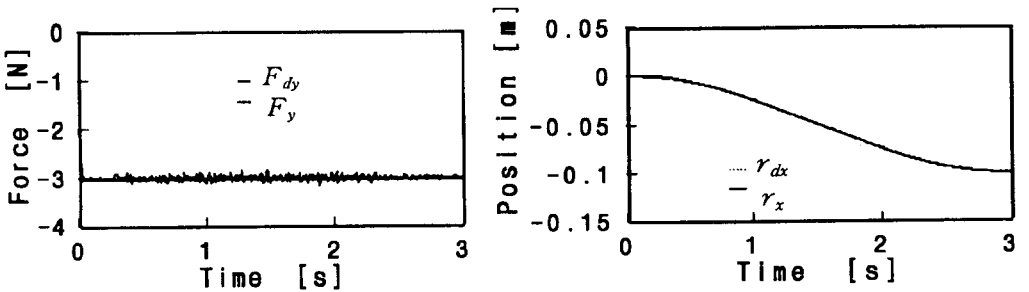


Fig. 10 Experimental results for case 5(PI+FF)

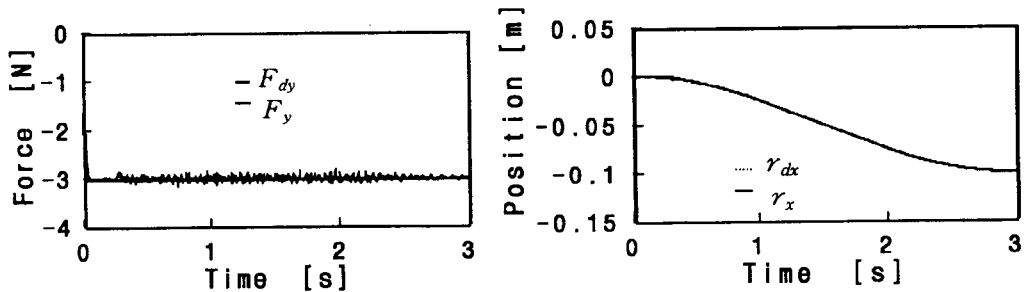


Fig. 11 Experimental results for case 6(PI)

이 목표 위치를 잘 추종하고 있음을 알 수 있다.

Fig.8(Case 3)은 I제어에 의한 힘 제어를 이용한 경우이며, Fig.9(Case 4)는 I+FF제어를 이용한 경우이다. Case 4를 Case 3에 비교하면 FF요소를 첨가시킨 결과, 힘에 대한 응답의 진동 성분이 줄었음을 알 수 있다.

Fig.10 ~ Fig.13은 강철판 위에 올려놓은

Mouse pad를 구속면으로 사용한 경우이며, 목표 위치에 대한 궤도 생성은 출발시와 정지시에 속도를 서서히 증가시키고, 늦추는 사다리꼴 속도 제어방식을 이용하였으며, 최대속도  $v=0.05$  [m/s], 최대가속도  $a=0.05$  [m/s<sup>2</sup>]을 이용하였다.

Fig.10(Case 5)은 PI+FF제어에 의한 힘 제어를 이용한 경우이며, 힘 제어에 대한 응답은 구속면이

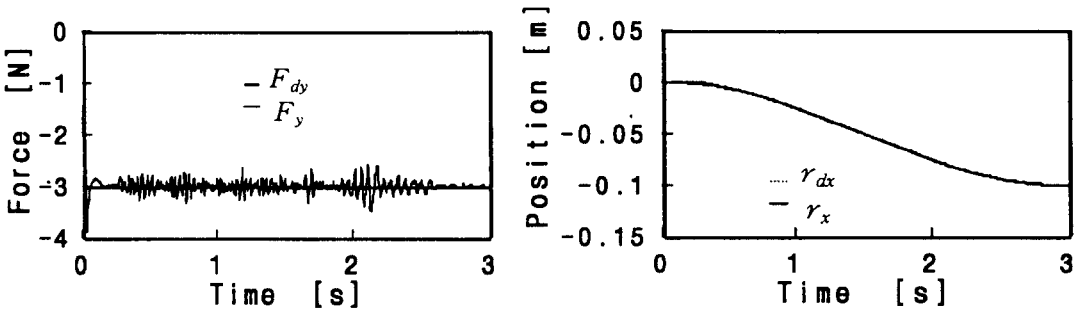


Fig. 12 Experimental results for case 7(I)

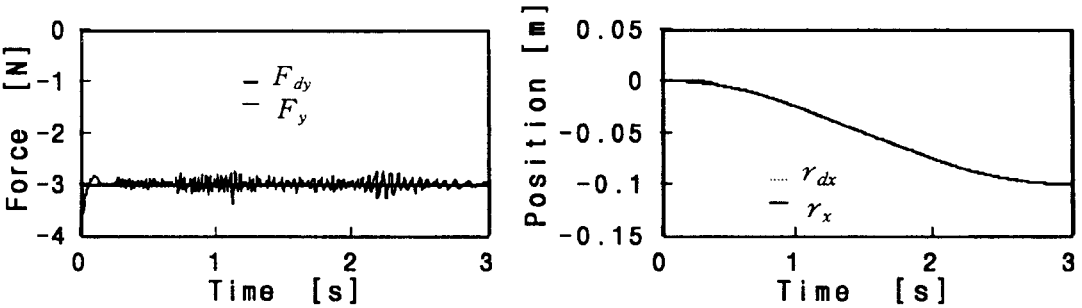


Fig. 13 Experimental results for case 8(I+FF)

저강성이므로 진동 성분이 매우 작고, 목표 힘에 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 위치 제어에 대한 응답은 고강성 구속면에 대한 실험 결과와 동일하게 목표 위치를 잘 추종하고 있음을 알 수 있다.

Fig.11(Case 6)은 PI제어에 대한 실험결과, Fig.12(Case 7)는 I제어에 대한 실험결과, 그리고, Fig.13(Case 8)은 I+FF제어에 의한 실험결과를

각각 나타낸다. 저강성 구속면에 대한 실험에서도 고강성 구속면에 대한 실험결과와 동일하게 PI+FF제어(Case 5)와 PI제어(Case 6), 그리고, I제어(Case 7)와 I+FF제어(Case 8)에 의한 실험결과를 각각 비교할 때, FF를 첨가시킨 제어기에 의한 실험결과가 목표 힘에 대한 오차가 적으며, 진동 성분을 감소시키는 효과가 있음을 알 수 있었

Table 3 Errors for experimental results

| Case   | Errors of force<br>$\overline{e_f}^2$ [N <sup>2</sup> ] | Errors of position<br>$\overline{e_p}^2$ [m <sup>2</sup> ] | Case   | Errors of force<br>$\overline{e_f}^2$ [N <sup>2</sup> ] | Errors of position<br>$\overline{e_p}^2$ [m <sup>2</sup> ] |
|--------|---|--|--------|---|--|
| Case 1 | 0.0563  | $285 \times 10^{-6}$                                       | Case 5 | 0.0139  | $281 \times 10^{-6}$                                       |
| Case 2 | 0.1280  | $305 \times 10^{-6}$                                       | Case 6 | 0.0216  | $294 \times 10^{-6}$                                       |
| Case 3 | 0.1962  | $343 \times 10^{-6}$                                       | Case 7 | 0.0537  | $321 \times 10^{-6}$                                       |
| Case 4 | 0.1329  | $325 \times 10^{-6}$                                       | Case 8 | 0.0294  | $315 \times 10^{-6}$                                       |



다. 이상의 실험결과에서 힘 및 위치에 대한 평균 자승오차를 Table 3에 나타냈다.

### 5. 결 론

이 논문에서는 로봇 선단을 사용하여 구속면에 대해 일정한 힘을 유지하며 구속면을 따라 이동시키는 하이브리드 위치/힘 제어실험을 하였다. 제안한 제어기는 피드백 제어에 비선형 보상기를 첨가시킨 위치 제어기와 피드백 제어에 피드포워드 요소를 첨가시킨 힘 제어기로 구성되어 있으며, 이를 비선형성이 강한 DD로봇에 적용, 고강성 및 저강성 구속면에 대한 위치/힘 제어 실험을 하였다. 실험 결과, 위치 제어는 피드백 제어에 DD로봇의 동역학적 모델을 기초로한 비선형 보상기를 첨가하므로써, 목표 위치를 효과적으로 잘 추종하는 실험결과를 얻을 수 있었다. 또한, 힘 제어에 대해서는 피드포워드 요소를 첨가시킴으로 인해, 기존의 피드백 제어를 이용한 실험 결과와 비교할 때, 목표 접촉 힘에 대한 오차가 감소하며, 특히 고강성 구속면에서 일어나기 쉬운 진동을 억제시키는 효과가 있다는 것을 알 수 있었다.

### 참 고 문 헌

- (1) Raibert, M.H. and Craig, J.J., 1981, "Hybrid Position/Force Control of Manipulators," ASME. Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Vol.102, No.2, pp.126~133.
- (2) Khatib, O., 1987, "A Unified Approach for Motion and Force Control of Robot Manipulators : The Operational Space Formulation," IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol. RA-3, No.1, pp.43~53.
- (3) Chen, Y.H. and Pandey, 1989, "Robust Hybrid Control of Robot Manipulators," Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.236~241.
- (4) Yoshikawa, T. and Sudou, A., 1990, "Dynamic Hybrid Position/Force Control of Robot Manipulators: On-Line Estimation of Unknown Constraint," Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.1231~1236.
- (5) Hogan, H., 1985, "Impedance Control : An Approach to Manipulation, Part I, II, III," ASME. Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Vol.107, No.1, pp.1~24.
- (6) Lawrence, D.A., 1988, "Impedance Control Stability Properties in Common Implementations," Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.1185~1190.
- (7) Mason, M.T., 1981, "Compliance and Force Control for Computer Controlled Manipulators," IEEE Trans, on System, Man and Cybernetics, Vol.SMC- II , No.6, pp.418~432.
- (8) Hwang, Y.Y. and Todo, I., 1992, "Movement of an Object by the Manipulating Force of a Jointed Elastic Robot Hand with Two Fingers and Four Degrees of Freedom," JSME International Journal(C), Vol.35, No.2, pp.245~251.
- (9) Asada, H. and Kanade, T., 1983, "Design of Direct-Drive Mechanical Arms," ASME, Journal of Vibration, Acoustics, Stress and Reliability in Design, Vol.105, No.3, pp.312~316.
- (10) Hwang, Y.Y. and Todo, I., 1994, "Cooperative Control of Two Direct-Drive Robots Using Neural Networks," JSME International Journal(C), Vol.37, No.2, pp.335~341.