

고무인공근 로봇트 매니퓰레이터의 위치 및 힘 제어에 관한 연구

진 상 호*, 게이고 와타나베*, 이 석 규**

A Study on Position and Force Control of A Robot Manipulator with Artificial Rubber Muscle

Sang-Ho Jin*, Keigo Watanabe* and Suck-Gyu Lee**

ABSTRACT

This paper describes position and force hybrid control for a robot manipulator with artificial rubber muscle actuators. The controller using two control laws such as PID control and fuzzy logic control methods is designed. This paper concludes to show the effectiveness of the proposed controller by some experiments for a two-link manipulator.

Key Words : Hybrid control(복합제어), PID control(PID 제어), Fuzzy logic control(퍼지논리제어), Robot manipulator(로봇트 매니퓰레이터), Artificial rubber muscle(인공고무근육)

1. 서론

최근 산업용으로 널리 이용되어지고 있는 로봇트 매니퓰레이터는 산업이 발달함에 따라 보다 더 복잡하고 고정밀도의 제어가 요구되어 지고 있다. 즉 복잡한 조립작업이나 가장자리 연마 등 작업 대상물과의 접촉을 수반하는 작업을 행하는 매니퓰레이터는 위치제어 뿐만 아니라 공구단과 작업대상물과의 기계적인 간섭력을 고려하여 제어를 해야한다.^{(1),(2)} 이러한 문제에서는 공구단의 방향과 힘의 크기 및 방향을 결정하여야 하며, 각각의 방향에 대해서 위치제어루우프 및 힘제어 루우프를 가진 혼합제어법이 많이 연구되어지고있다.^{(3),(4)} 현재 현장에서 사용되어지고 있는 산업용 로봇트 매니퓰레이터

의 구동부는 전동식 및 유압식이 주류이다. 그러나 이와같은 로봇트 매니퓰레이터는 인간에 비해 힘이 너무나 강하고 컴플라이언스가 매우 낮기 때문에 안전성에 문제가 있다. 이 문제의 해결에 기대되는 구동부로서 공기 구동형의 고무인공근육이 있으며, 유연하고 일반적인 전동식이나 유압식에 비해 컴플라이언스가 높다는 특별한 장점을 이용한 힘 제어에 관한 많은 연구가 행하여지고있다.^{(5)~(9)} 본 연구는 고무인공근육 2관절 매니퓰레이터를 사용해서 수학적모델에 의존하지않고 위치 및 힘의 혼합 제어의 실현을 목적으로 한다. 이와 같은 경우 혼합 제어를 행하기 때문에 위치는 PID 제어법칙, 힘은 PI 제어법칙을 사용하고 PID제어기와 이들의 피이드백 이득을 최적이 되도록 조정하는 것이 쉽지않

* 佐賀대학교 기계공학과

** 영남대학교 전기공학과

기 때문에 숙련된 오퍼레이터의 경험에서 얻을수 있는 know-how를 간단한 언어로 표현하고 이것으로 매니퓰레이터를 제어 할 수있는 퍼지제어기의 설계하였다. 또한 제안된 제어기를 실제 실험에 적용하여, 그 효용성을 입증하였다.

2. 실험장치

Fig. 1은 본연구의 실험에 사용된 고무인공근육을 사용한 2관절 매니퓰레이터의 외관을 나타낸다. 제어기로써는 개인용 컴퓨터 (PC-9801FA, CPU486sx16 [MHz], OverDrive Processor)를 사용했다. 매니퓰레이터는 수평방향으로만 구동되도록 설치해서 중력에 의한 영향은 없다고 가정한다. 힘은 손끝에 달아둔 센서 왜곡 게이지에서 측정하고 이것을 미소 전기신호로써 검출하여 증폭하고 A/D 변환기를 통하여 컴퓨터에 피드백시켰다. 작업대상물체로써는 단단한 물체는 강판을 사용하고 유연한 물체로는 강판 위에 천연고무를 길게 펴서 붙여 사용한다. Table 1은 측정한 각 매개변수를 나타내고 있다.

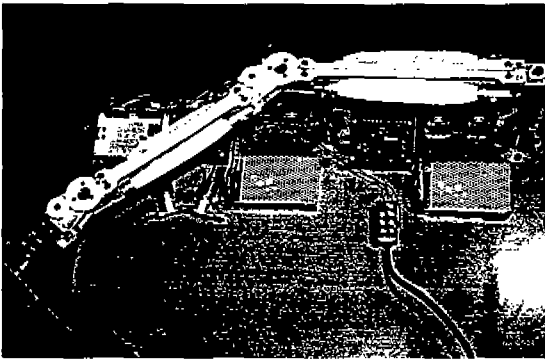


Fig. 1 본연구에 사용된 실험장치

Table 1 매니퓰레이터의 모델 파라미터

	Mass m_i [kg]	Inertia I_i [kgm ²]	Length l_i [m]	Length of c.g. l_{c_i} [m]
Link 1	1.390	0.027340	0.385	0.160
Link 2	0.533	0.000916	0.165	0.054

3. PID 제어기

본 실험에 사용한 PID 제어기의 블록선도를 Fig. 2에 표시하였다. 물체좌표계에서의 목표궤도 ${}^c X_d(t)$ 와 목표힘 ${}^c F_d(t)$ 인 경우 다음과 같은 편차를 고려한다.

$$\Delta X(t) = {}^c X_d(t) - \Lambda(\theta(t)) \tag{1}$$

$$\Delta \dot{X}(t) = {}^c \dot{X}_d(t) - s\Lambda(\theta(t)) \tag{2}$$

$$\Delta F(t) = {}^c F_d(t) - T(\theta(t)) {}^c F_s(t) \tag{3}$$

단, 여기는 s 는 미분작용소, Λ 는 위치좌표변환함수, ${}^c F_s$ 는 센서의 출력, θ 는 관절좌표계에서의 관절각도를 각각 나타낸다. 여기서 선택행렬 S 에 있어서 위치제어된 X 축 좌표성분을 0, 힘제어된 Y 축 좌표성분을 1로 하고 물체좌표계에서의 위치제어방향의 궤도오차 $e_1(t)$ 및 오차미분 $\dot{e}_1(t)$, 힘제어방향에서의 힘오차 $e_2(t)$ 는 다음과 같이 나타낸다.

$$e_1(t) = (I - S) \Delta X(t) \tag{4}$$

$$\dot{e}_1(t) = (I - S) \Delta \dot{X}(t) \tag{5}$$

$$e_2(t) = S \Delta F(t) \tag{6}$$

단,

$$\Lambda(\theta) = \begin{bmatrix} l_{n1} \cos(\theta_1(t) - \varphi) + l_{n2} \cos(\theta_1(t) + \theta_2(t) - \varphi) \\ l_{n1} \sin(\theta_1(t) - \varphi) + l_{n2} \sin(\theta_1(t) + \theta_2(t) - \varphi) \end{bmatrix} {}^c X_0$$

여기서 φ 는 벽면의 기울기, ${}^c X_0$ 는 초기자세, l_i 는 링크 i 의 길이를 나타낸다.

또한 위치제어 루우프에 PID법칙을 사용하고, 힘제어 루우프에 PI제어기를 사용 하는 경우 매니퓰레이터의 각관절의 구동 토크는 다음과 같다.

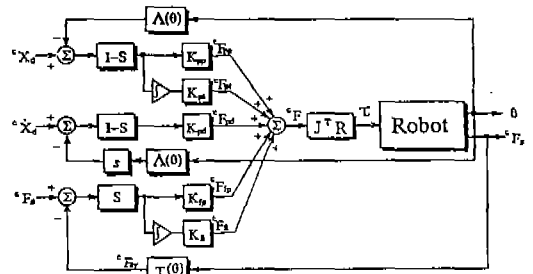


Fig. 2 PID 제어시스템의 블럭다이어그램

$$\begin{aligned}
 {}^c F &= ({}^c F_{pp} + {}^c F_{pi} + {}^c F_{pd}) + ({}^c F_{fp} + {}^c F_{fi}) \\
 &= K_{pd} \dot{e}_1(t) + K_{pp} e_1(t) \\
 &\quad + K_{pi} \int_0^t e_1(t) dt + K_{fd} \dot{e}_2(t) + K_{fd} \int_0^t e_2(t) dt \\
 \tau &= J^T R^c F \tag{7}
 \end{aligned}$$

여기서, K_{pp} , K_{pi} , K_{pd} 는 위치 피드백 이득, K_{fp} , K_{fi} 는 힘 피드백 이득 이고, 또한 J 는 자코비안행렬, R 는 회전행렬로 아래와 같이 된다.

$$J = \begin{bmatrix} -(l_1 S_1 + l_2 S_{12}) & -l_2 S_{12} \\ l_1 C_1 + l_2 C_{12} & l_2 C_{12} \end{bmatrix}$$

$$R = \begin{bmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi \\ \sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix}$$

$$R^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi \\ -\sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix}$$

단,

$$\begin{aligned}
 S_1 &= \sin \theta_1, & S_{12} &= \sin(\theta_1 + \theta_2) \\
 C_1 &= \cos \theta_1, & C_{12} &= \cos(\theta_1 + \theta_2)
 \end{aligned}$$

이다.

4. 퍼지제어기

4. 1 간략화된 퍼지추론

Fig. 3에 본실험에 사용한 퍼지 제어기의 블록선도를 나타내었다. 퍼지제어기를 설계하기 위해 Mandani의 방법⁽¹⁰⁾을 단순화시켜, 마지막 후진부를 정수값으로 한 간략화된 퍼지 추론법⁽¹¹⁾을 이용하였다. 이 방법에서는 $2n$ 개의 입력변수 ($e_1, \dots, e_n, \dot{e}_1, \dots, \dot{e}_n$), p 개의 출력변수 (u_1, \dots, u_p)의 경우, 임의의 i 번째의 제어법칙은

$$\begin{aligned}
 R_i : & \text{If } e_1 = A_{i1} \text{ and... and } e_n = A_{in} \\
 & \text{and } \dot{e}_1 = A_{i(n+1)} \text{ and...and } \dot{e}_n = A_{i(2n)} \\
 & \text{then } u_1 = B_{i1} \text{ and... and } u_p = B_{ip} \tag{8}
 \end{aligned}$$

로 된다. 여기에서 R_i 는 i 번째의 제어법칙, A_{ij} 는 i 번째

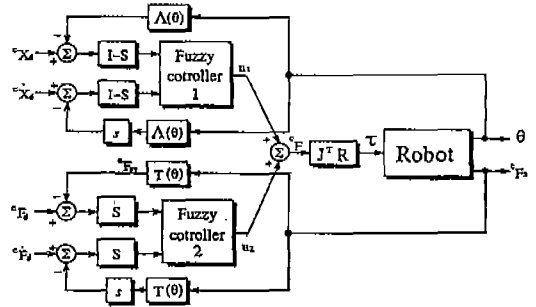


Fig. 3 퍼지제어시스템의 블록다이어그램

의 제어법칙에서의 j 번째 입력변수에 대응하는 전진부 퍼지집합(혹은 퍼지수)을 표시하고, B_{ij} 는 i 번째의 제어법칙의 j 번째의 출력변수에 대응하는 정수치이다.

전진부적합도 h_i 는 멤버십 함수의 적합도

$U_{A_{i1}}(e_1), \dots, U_{A_{in}}(e_n), U_{A_{i(n+1)}}(\dot{e}_1), \dots, U_{A_{i(2n)}}(\dot{e}_n)$ 을 이용하면

$$h_i = U_{A_{i1}}(e_1) \wedge U_{A_{i2}}(e_2) \dots \wedge U_{A_{in}}(e_n) \wedge U_{A_{i(n+1)}}(\dot{e}_1) \wedge U_{A_{i(n+2)}}(\dot{e}_2) \dots \wedge U_{A_{i(2n)}}(\dot{e}_n) \tag{9}$$

로 된다. 여기서 는 최소연산자이다. 이 경우 j 번째의 출력의 추론결과는 다음과 같이된다.

$$u_j^* = \frac{\sum_{i=1}^r h_i B_{ij}}{\sum_{i=1}^r h_i}, \quad j = 1, \dots, p \tag{10}$$

여기서 r 은 총제어 규칙수가 되고 전진부 퍼지수의 종류수(마지막 Level)를 l 로 할때 일반적으로 $r = l^{2n}$

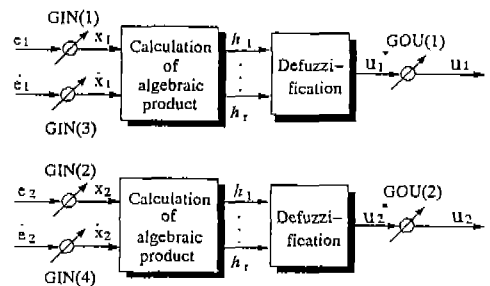


Fig. 4 퍼지제어기의 블록다이어그램

가 된다. Fig. 4는 퍼지제어기의 개념도를 표시한다. 여기에서 $GIN(i)$, $i=1, \dots, 2n$ 은 입력데이터 $e_1, \dots, e_n, \dot{e}_1, \dots, \dot{e}_n$ 의 값이며, $GOU(i)$, $i=1, \dots, p$ 는 추론결과 u_1^*, \dots, u_p^* 의 출력값이다.

입력값의 초기치는 제어실험에서 얻어진 데이터의 최대치에서 쉽게 정해지지만 실제 실험에서는 때로는 scaling되어진 데이터가 대집합상에서 벗어나는 경우가 있다. 이와같은 문제를 회피하기 위해서 식 (11)과 같은 scaling법을 이용하였다.

$$GIN(i)_{new} = \begin{cases} \frac{0.9L}{|x_i|} & \text{if } |GIN(i)_{old} \times x_i| > L \\ GIN(i)_{old} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (11)$$

이 방법은 만약 scaling한 퍼지 추론입력 데이터가 $[-L, L]$ 에서 벗어나지 않으면 입력 데이터는 대집합의 90%의 범위내에서 다시 scaling하게 된다.

4.2 후건부 설계

멤버십 함수의 적합도는 실제의 입력데이터와 관계가 있으며, i 번째의 제어법칙에 있어서 대집합상에서 그 데이터분포의 어느정도 포함하고 있음을 나타내게 된다. 종래의 함수형이나 간략형추론에서는 이 데이터에 분포 정보가 후건부에서는 사용되어지지 않는다.

본 연구에서는 전건부에서 가정한 데이터분포의 정보를 사용해서 이 멤버십 함수의 평균치 U_c 를 후건부의 함수로 한 평균치 함수형추론^[12]을 이용하였다. 따라서 전건부멤버십 함수의 평균값 U_c 를 상대값으로 보지않는 슬라이딩 모드제어를 고려한다면

$$\sigma = Su_c \quad (12)$$

로 된다. 또 S 는 $1 \times n$ 의 설계가능한 벡터, $U_c = [U_{c1}, U_{c2}, \dots, U_{cn}]^T$ 의 상태값 σ 는 후건부정수값(슬라이딩면)으로 된다. 여기에서, e, \dot{e} 의 2입력, 1출력의 경우를 고려해 본다면

$$\sigma_i = K \begin{bmatrix} e_{ci} \\ \dot{e}_{ci} \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$K = [\alpha/\beta, 1/\beta]$$

와 같이 α, β 와같은 파라메타를 이용하여 나타낼수 있

다. 또 e_{ci}, \dot{e}_{ci} 는 대집합상에서 정의되어진 i 번째 제어 법칙에서 발생하는 e, \dot{e} 에 관한 평균값이 된다.

또한, 위의 α, β 의 설정값을 이용하고 비선형성을 고려해서 $if(e = NB \text{ or } PB) \text{ or } (e = NM \text{ or } ZO \text{ or } PM)$ 를 이용한다. 이외에는 표준의 $\alpha=1, \beta=2$ 을 이용한다. 본 논문에서는 퍼지레벨수 5의 퍼지집합과 25의 제어법칙(Table 2)을 얻고 멤버십 함수는 삼각형으로 한다. 다만, 대집합은 $[-12, 12]$ 의 정수값으로 한다.

Table 2 5 레벨에 대한 제어규칙표

e_i	\dot{e}_i				
	NB	NM	ZO	PM	PB
NB	-12	-9	-6	-3	-6
NM	-12	-9	-6	-3	0
ZO	-6	-3	0	3	6
PM	0	3	6	9	12
PB	6	3	6	9	12

5. 힘센서

대상물체에 가해지는 힘을 정확하게 측정하기 위해 만든 힘센서는 Fig. 5에 나타나 있다. 이센서는 일정한 방향으로 밖에 움직이지 않도록 설계되어 있어서 한방향의 힘 밖에 검출할 수 없다. (slide형)

5.1 힘센서의 특성

제작된 센서의 특성을 조사하기 위해서 대상물체와 센서의 접촉각도를 어떤 각도에 고정시킬때 대상물체에 가해지는 힘을 0.49[N]간격에서 0~9.8[N]까지 가했다. 이때 대상물체에 가해지는 힘을 힘센서를 사용해서 전압으로서 측정된 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 여기에서 $\square, \nabla, \diamond, \triangle$ 는 힘센서 대상물체의 접촉각도에 원쪽방향으로 각각 40, 30, 20, 10(deg)로 되고, \bullet 는 수직 $\blacktriangle, \blacklozenge, \blacktriangledown, \blacksquare$ 는 오른쪽방향으로 각각 40, 30, 20, 10(deg)로 된다. Fig. 5에 나타난 것처럼 대상물체에 가해지는 힘을 F_{sy} [N], 힘센서에 가해지는 힘을 F_s [N], 접촉각도를 α (rad)라 하면

$$F_{sy} = F_s \cos \alpha \quad (14)$$

라는 함수가 된다. 이 결과로 접촉각도에 의해 생기는

모멘트의 영향은 거의없는 것으로 가정할수 있다. 또 최소자승법을 이용해서 근사관계를 구하면 Fig. 5의 직선을 얻는다. 단, V 는 힘센서에서의 출력전압이다.

$$F_{sy} = \alpha V + b \quad (15)$$

$$(a = 2.923748, b = -0.2297288)$$

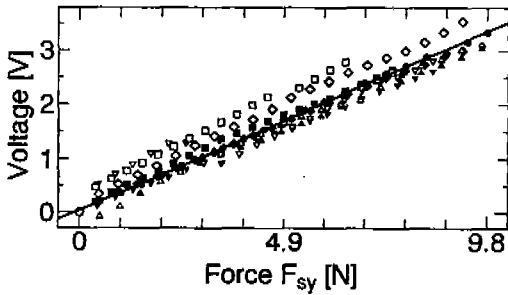


Fig. 5 힘센서의 대상물체에의 적용

5.2 필터

힘센서에서 검출된 계측데이터는 증폭 등의 아날로그 처리 과정 등에 의해 잡음성분을 포함하고 있다. 이 잡음은 실험장치 자체에 접지를 하고 왜울기의 차단주파수를 10(Hz)로하여 상당히 소거할 수가 있다. 그러나, 없어지지 않는 고주파 성분의 잡음은 Butter-worth 필터를 사용하여 제거하였다. Butter-worth 필터의 설계에는 MATLAB을 이용한다. 힘, 힘미분, 속도의 power spectrum에서 차단주파수를 각각 2(Hz), 0.5(Hz) 및 0.5(Hz)로 하였다.

6. 실험

여기에서는 위에서 설명한 제어기를 이용해서 고무인 공근육 2관절 매니퓰레이터에 의한 힘의 혼합 제어실험을 하였으며, 2 관절 매니퓰레이터의 모델을 Fig. 6에 나타내었다. 이값은 고정된 대상물체에 초기접촉점을 결정하고, 매회, 힘센서의 값이 약 0.0024[V] (0.0002[N])때 접촉상태로 인식한다. 이 초기자세는 단단한 대상물체에는 $\theta_1 = 24.19(\text{deg})$, $\theta_2 = 24.19(\text{deg})$ 로 하였으며, 실험시간은 20(sec), 샘플링시간은 0.025(sec), 작업거리는 0.075(m)로 하였다. 또한 압

축기에서의 공기 압력은 6 [kgf/cm²]로 하였다. 실험은 계단입력 (2.5(N) → 5(N))을 가해서 제어를 단단한 대상물과 유연한 대상물에 대해서 행하였다.

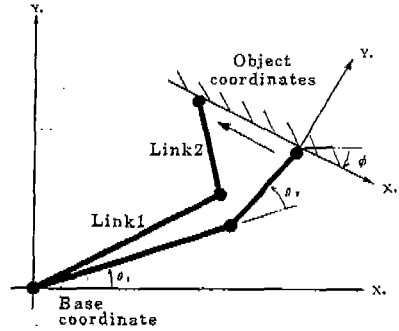


Fig. 6 2 링크 매니퓰레이터의 모델

7. 결론

본 연구에서는 수학적인 모델링이 어려운 인공근육인 공근육 2 관절 매니퓰레이터에 대하여 수학적모델에 의존하지 않는 위치와 힘의 복합제어를 행하였으며, PID제어기, 퍼지제어기의 설계를 하여 이들의 실효성을 실험에 의해 검증했다. 단단한 대상물체에 대해서 PID제어기를 이용해서 행한 실험결과를 Fig. 7에 표시되었으며

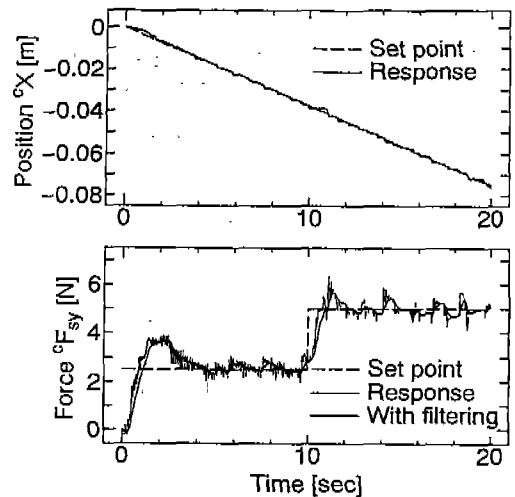


Fig. 7 단단한 대상물체에 대한 PID제어의 실험결과

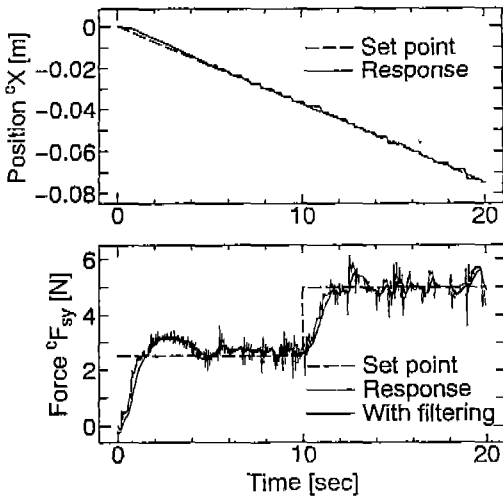


Fig. 8 단단한 대상물체에 대한 퍼지제어의 실험결과

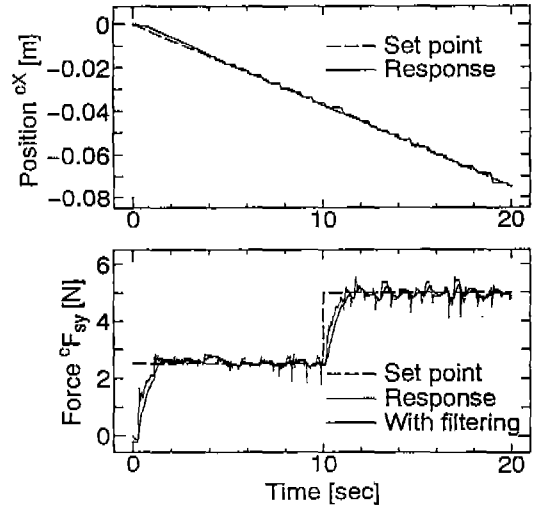


Fig. 10 유연한 대상물체에 대한 퍼지제어의 실험결과

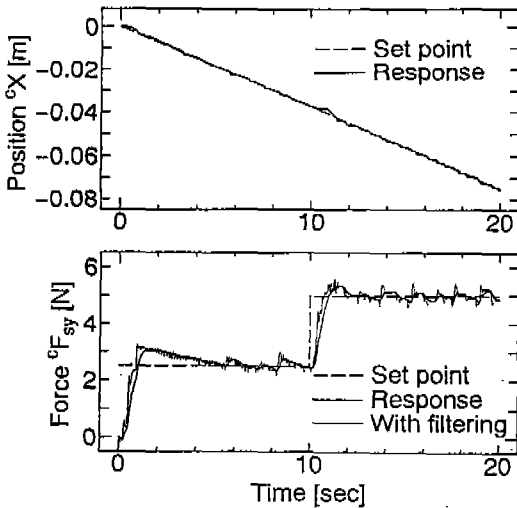


Fig. 9 유연한 대상물체에 대한 PID제어의 실험결과

이때 위치결정에 이용한 피드백이득은 K_{pp} [N/m] = 0.22, K_{pi} [N/ms] = 0.08, K_{pd} [N/m] = 0.02이며, 힘에 이용된 피드백이득은 K_{fp} = 0.0024, K_{fr} [1/s] = 0.00001로 된다. 입력값 GIN(1) = 5,000, GIN(2) = 1000, GIN(3) = 3000, GIN(4) = 1000, 출력값 GOU(1) = 0.00006, GOU(2) = 0.0005로 될 때의 퍼지제어기를 이용해서 행하는 실험결과를 Fig. 8에 나타내었다. 유

연한 대상물에 대해서, PID 제어기를 이용한 때의 실험결과를 Fig. 9에 표시하며, 이때 피드백이득을 단단한 대상물에 이용한 결과와 같이하였다. 입력스케일 GIN(1) = 5000, GIN(2) = 1000, GIN(3) = 3000, GIN(4) = 1000 출력값 GOU(1) = 0.00005, GOU(2) = 0.001일 때의 퍼지제어기의 실험결과를 Fig. 10에 나타내었다. PID제어기의 실험결과에서 알 수 있듯이 유연한 대상물에서는 단단한 대상물에 비해서 진동은 약30%정도 감소되고, overshoot 양은 약 반으로 줄었다. 이것은 대상물체의 체동계수가 크기 때문으로 생각되어진다. 또한, 위치제어결과는 양대상물 모두 좋은 결과가 얻어졌다. 한편, 퍼지제어기의 결과에 있어서 위치제어의 결과는 PID제어기와 대략 같은 결과를 얻는다. 또한, 힘제어에 관해서는, PID제어기에 비해서 오버슈트가 있다. 그러나, 시작시간이 PID제어기의 1(sec)정도에 대해 2(sec)정도 되고있다.

참고문헌

1. M.T. Mason: "Compliance and Force Computer Controlled Manipulator", IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, SMC-11-6, pp.418-432, 1981.
2. G.M Bone, M.A. Elbestawi, R. Lingarkar

- and L.Liu: "Force Control for Robotic Deburring", Transactions of the ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, September, 113, pp. 395-400, 1991.
3. M.H. Raibert and J.J Craig: "Hybrid Position/Force Control of Manipulators", Transactions of the ASME, Journal of Dynamics Systems, Measurement, and Control, 102, pp.126-133, 1981.
 4. 吉川恒夫: "ロボットアームの位置と力の動的ハイブリッド制御-手先拘束の記述と関節駆動力の算出-", 日本ロボット學會誌, 3-6, pp.531-537, 1985.
 5. 谷口隆雄, 山下 忠: "ゴム人工筋指機構の押し付け力制御", ロボティクス メカトロニクス講演會 '90 講演論文集, A 900-30, pp.3-6, 1990.
 6. 吉川智幸, 則次俊郎: "ゴム人工筋のインピーダンス制御", 第9回日本ロボット學會學術講演會, pp.789-790, 1991.
 7. 松下哲也, 相良慎一, 山下 忠, 谷口隆雄: "ラバチューマを用いた一軸ロボットハンドの力制御", 日本ロボット學會誌, 11-3, PP.461-467, 1993.
 8. 武内顯一, 奥野 康, 大場康洋, 山下 忠, 相良慎一: "ゴム人工筋を用いた1リンクアームコンプライアンス制御", ロボティクス メカトロニクス講演會 '93講演論文集, 930-40, pp.62-65, 1993.
 9. 富山 健 田中 潤, 高巖英樹: "空気圧式人工筋肉を用いたベタリングロボットの力制御", ロボティクス メカトロニクス '講演會' '93講演論文集, No.930-40, pp.360-363, 1993.
 10. E.H.Mamdani: "Advances in the Linguistic Synthesis of Fuzzy Controller", Int. J.Man-Machine Studies, 8-6, pp.669-679, 1976.
 11. 水本雅晴: "ファジィ制御向きのファジィ推論法", 計測と制御, 28-11, pp.959-963, 1989.
 12. 渡部桂吾, 原 勝弘: "平均値關數型推論によるファジィ制御器設計", 第32回SICE學術講演會豫稿集, pp.857-858, 1993.
 13. 桶口龍雄: "デジタル信號處理の基礎", 昭晃堂, 1986.