한국공작기계학회논문집 Vol.12 No.1 2003. 2.
Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers

구속받는 유연 매니퓰레이터의 능동적 컴플라이언스 제어

김진수*

(논문접수일 2002. 8. 22, 심사완료일 2002. 12. 30)

Active Compliance Control of Constrained Flexible Manipulators

Kim Jin-Soo*

Abstract

In this paper, we discuss the control scheme on active compliance control of flexible manipulators. The active compliance control scheme is extended from the scheme for rigid manipulators. To illustrate the validity of the proposed control scheme, we show experimental results for the case when the end-effector is not moving, and when it is moving while applying force. Although flexible manipulators show some problems of stability yet, it is clear from these results that flexible manipulators are more effective to reduce damage of environment because of link flexibility than rigid ones.

Key Words : Active compliance(능동적 컴플라이언스), Flexible manipulator(유연 매니퓰레이터), Environment(작업환경), Experimental result (실험결과), Link flexibility (링크 유연성)

1. 서 론

종래 산업용 로봇은 대부분 위치만을 정확히 제어함으로 작업을 수행할 수 있는 도장, 용접 등과 같은 단순 분야에 활용되어 왔으나, 최근에는 연마, 조립, 대형 물체 운반 등과 같이 매니퓰레이터 선단의 위치 및 접촉력을 동시에 제어할 필요가 있는 작업에 활용도가 높아지고 있다. 이와 같이 매니퓰레이터와 작업환경 사이에 기구학적 간섭이 발생하는 경우, 매니퓰레이터와 작업환경 사이에 발생하는 접촉력이 급격하게 증가하면 양쪽에 심각한 손상을 야기할 수 있으므로 목적하는 작업에 맞게 부드럽게 제어할 필요가 있다. 이러한 필요성에 의해서 힘 제어에 관해서 위치/힘 병렬제어, 임피던스 제어 등 많은 연구가 수행되고 왔으나, 대부분의 강체 매니퓰레이터를 대상으로 연구되고 있다[(1)-(3)]. 매니퓰레이터와 작업 환경이 모두 강체인 경우보다는 한쪽만이라도 부드러운 경우가 보다 기구학적인 간섭을 용이하게 제어할 수 있을 것이다. 이러한 관점에서 유연 매니퓰레이터를 이용한 힘 제어가 환경에 친화적이라 생각된다.

초기 유연 매니퓰레이터의 연구는 진동 억제제어가 주요 목적이었으나[(4)], 최근에는 궤도제어 및 힘 제어, 협조제어 등과 같은 복잡한 제어의 연구가 수행되고 있다[(5~9)]. 또한탄성링크의 구조적인 특성을 활용하여 힘 제어한 결과를 실

* 주저자, 전주대학교 기계공학과 (jskim@jeonju.ac.kr)
주소: 560-759 전북 전주시 완산구 효자동 3가 1200번지

험적으로 제시한 연구도 있다. 그러나 유연 매니퓰레이터의 힘 제어는 복잡한 동적 모델로 인해서 연구는 아직 미미하나, 우주용 로봇 및 고압전선 작업용 로봇 등과 같은 경량용 매니퓰레이터의 일반적인 작업을 고려할 때 유연 매니퓰레이터의 힘제어의 필요성은 커지고 있다. 이러한 관점에서 본 논문은 유연 매니퓰레이터를 이용한 힘제어에 대해서 논하고자 한다.

본 연구에서는 매니퓰레이터의 위치, 속도, 가속도와 힘의 관계를 이용하여 매니퓰레이터와 작업 환경 사이에 발생하는 접촉력을 제어하는 컴플라이언스 제어법을 유연 매니퓰레이터에 적용한다. 또한 이 제어법을 실험기 ADAM (Aerospace Dual-Arm Manipulator)[10]에 적용하고자 단순화한 능동적인 컴플라이언스 제어법을 제안한다. 또한 실험적인 평가를 통하여 제안한 제어법의 타당성을 입증한다.

2. 실험장치

본 연구에 사용된 유연 매니퓰레이터 ADAM는 2개의 팔을 갖고 있으며, 각각의 팔은 2개의 유연 링크와 7개의 회전 관절로 구성되어 있다. Fig. 1은 실험기 ADAM의 한쪽 매니퓰레이터를 이용한 실험 시스템 및 구속환경의 외관의 개략도를 보여준다. 매니퓰레이터의 관절 1~3, 관절4, 5, 관절 6, 7은 각각의 차동기구를 이용하여 모터 1~3, 모터 4, 5, 모터 6, 7에 의해서 구동된다. 모터로서는 DC서보 모터를 이용하고 있으며, 감속기를 내장하고 있다. 그 감속비는 1/80이다. 관절 1~3은 타코메타(tachometer)와 광학 엔코더(optical encoder)를 내장, 관절 4~7은 광학 엔코더만 내장하고 있다. 모터의

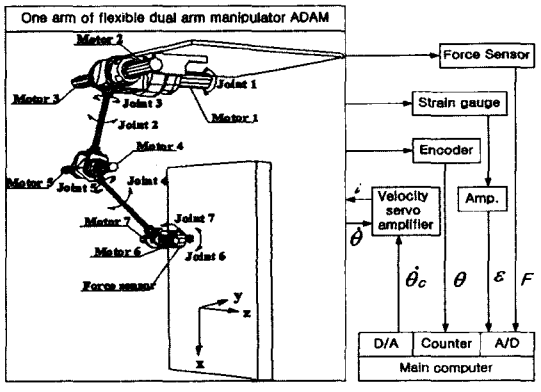


Fig. 1 Overview of experimental robot system

회전 각속도는 관절 1~3의 경우 내장 타코메타로부터, 관절 4~7의 경우는 내장 광학 엔코더로부터 검출된 회전 각 펄스 신호를 F/V(Frequency to Voltage) 변환함으로써 검출되며, 이 회전 각속도는 서보 앰프에 입력된다. 각 링크의 진동은 스트레인 게이지(strain gauge)를 이용하여 검출하며, 매니퓰레이터의 선단에 작용하는 접촉력은 Force/Torque 센서를 이용하여 검출한다. Table 1에 실험 로봇 ADAM에 대한 각각의 제원을 나타냈다.

3. 능동 컴플라이언스 제어계

3.1 제어 입력치

속도 입력형 서보모터의 경우, 속도 입력치와 서보모터의 출력 토오크의 관계는 고차의 복잡한 식으로 표시된다. 그러므로 다음과 같은 근사식을 이용하여 출력 토오크를 계산

Fig. 2 A photograph of experimental robot setup

Table 1 Parameters of ADAM

Parameter		Value
Length of link 1	[m]	0.50
Length of link 2	[m]	0.50
Bending stiffness of link 3	[Nm^2]	291.6
Bending stiffness of link 5	[Nm^2]	102.1
Mass of elbow	[kg]	6.0
Mass of wrist and end-effector	[kg]	2.7

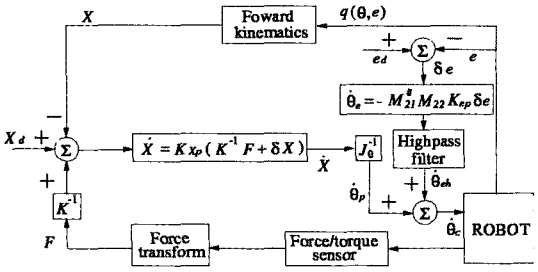


Fig. 3 Active compliance controller

한다[6~9].

$$\begin{aligned}\tau &= G_r K_{sp}(V_{ref} - K_{sv}\dot{\theta}_m) \\ &= \Lambda(\dot{\theta}_c - \dot{\theta})\end{aligned} \tag{1}$$

여기서, G_r는 모터의 감속비 행렬, K_{sp}는 속도 궤환 행렬, K_{sv}는 전압/속도 계수 행렬, $\dot{\theta}_m = G_r\dot{\theta}$는 모터의 감속전의 회전 각속도 벡터, $\dot{\theta}_c$는 속도 입력치, $\Lambda = G_r^2 K_{sp} K_{sv}$는 속도 궤환 이득이다. 속도 입력 전압벡터 V_{ref}는 다음과 같다.

$$V_{ref} = G_r K_{sv}\dot{\theta}_c \tag{2}$$

전체 시스템의 입력속도를 $\dot{\theta}_c$는

$$\dot{\theta}_c = \dot{\theta}_p + \dot{\theta}_{eh} \tag{3}$$

이며, $\dot{\theta}_p$는 매니퓰레이터의 능동 컴플라이언스를 제어하기 위한 입력속도, $\dot{\theta}_{eh}$는 진동제어를 위한 입력속도이다. Fig. 3에 유연 매니퓰레이터의 능동적 컴플라이언스 제어계의 블록선도를 나타낸다.

3차원 유연 매니퓰레이터의 구속 운동에 있어서 링크에 발생하는 탄성 변형이 매니퓰레이터 선단과 환경사이에서 발생하는 접촉력에 구속받는 지 여부에 따라 두 종류의 부분 시스템으로 분류할 수 있다. 링크의 탄성변위와 구속력의 종속관계로 인해서 구속력만을 제어함으로써 진동제어 루프 없이도 링크의 진동을 억제할 수 있는 구속운동 부분 시스템과 링크의 탄성변위가 구속력에 영향을 받지 않는 자유운동 부분 시스템이 존재한다[7]. 이 자유운동 부분 시스템은 일반적으로 자유공간에서 운동하는 유연 매니퓰레이터와 동일하다. 본 논문에서 구속운동 부분 시스템 범위 안에서의 운동에 한정해서 논의함으로 진동제어를 이용하지 않는다. 만약, 논의 대상을 3차원 운동으로까지 확장한다면 자유운동 부분 시스템이 존재하기 때문에 발생하는 링크 진동을 억제하기 위해서 Fig. 3과 같이 진동 억제제어 루프는 필요하다[7~8].

3.2 능동 컴플라이언스 제어 입력치

매니퓰레이터 선단에 외력 F가 작용하는 경우, 관절의 운동방정식을

$$M_0\frac{d\dot{X}}{dt} + D_0\dot{X} + K_0(X - X_d) = F \tag{4}$$

으로 표현할 수 있으며, 여기서 M_0, D_0, K_0계수는 임피던스 특성이며, M_0는 원하는 질량 특성, D_0는 점성특성, K_0는 강성특성, X는 작업 좌표벡터, X_d는 목표위치궤도이다. 식(4)을 가속도 벡터에 대해서 정리하면 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\frac{d\dot{X}}{dt} = M_0^{-1}[F - D_0\dot{X} + K_0(X - X_d)] \tag{5}$$

식(5)의 양변을 적분하면

$$\dot{X} = M_0^{-1}\int[F - D_0\dot{X} + K_0(X - X_d)]dt \tag{6}$$

이 된다. 식(6)을 이산화하면, n회 째 샘플링(Sampling)의 매니퓰레이터 선단의 속도 $\dot{X}_n$은 식(6)의 우변의 $\dot{X}$을 n-1회 째의 선단속도 입력치 $\dot{X}_{n-1}$에 근사시키면 다음과 같다[11].

$$\begin{aligned}\dot{X}_n = {} & TM_0^{-1}K_0[K_0^{-1}F + (X - X_d)] \\ & + (I - TM_0^{-1}D_0)\dot{X}_{n-1}\end{aligned} \tag{7}$$

여기서, T는 샘플링 간격, I는 단위행렬이다. 또한 제어 입력을 단순화시키기 위해서 식(7)의 우측 2번째 항의 점성특성은 진동억제 제어입력과의 간섭이 발생할 수 있으며, 또한 점성정수행렬 D_0만을 결정하는 것은 어려움이 있으므로 $I - TM_0^{-1}D_0 = 0$이 되도록 점성정수행렬 D_0을 결정하면 식(7)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{X}_n = K_{Xb}[K_0^{-1}F + (X - X_d)] \tag{8}$$

여기서, $K_{Xp}=TM_0^{-1}K$ 이다.

속도형 서보모터의 제어 입력치는 각속도 벡터이므로, 매니퓰레이터 선단의 속도 오차벡터 δX는 다음과 같다.

$$\dot{X}=J_\theta\ \dot{\theta}+J_e\ \dot{e} \tag{9}$$

여기서, $\dot{\theta}\in R^m$는 관절 각속도 벡터, $\dot{e}\in R^n$는 탄성변위 속도벡터이다. $J_\theta\in R^{6\times n}$, $J_e\in R^{6\times m}$는 각각 관절각 벡터와 탄성변위 벡터에 관한 Jacobian 행렬이다. 식(8)을 $\dot{\theta}$에 대해서 정리하면 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\dot{\theta}_p=J_\theta^{-1}[\ \dot{X}-J_e\dot{e}] \tag{10}$$

이며 J_θ^{-1}는 J_θ의 역행렬이다. 여기서 진동 억제 제어로 인하여 $\dot{e}$가 미소하다고 가정하여 $J_e\dot{e}$ 항을 무시하면 능동 컴플라이언스 제어 입력치는 다음과 같이 구 할 수 있다.

$$\begin{aligned}\dot{\theta}_p&=J_\theta^{-1}\ K_{Xp}\ \dot{X} \\ &=J_\theta^{-1}K_{Xp}[K_0^{-1}F+(X-X_d)]\end{aligned} \tag{11}$$

4. 실험결과 및 고찰

본 연구에 사용된 유연 매니퓰레이터 ADAM는 2개의 암을 갖고 있으며, 각각의 암은 2개의 유연 링크와 7개의 회전 관절로 구성되어 있다[10]. 본 논문에서는 2개의 암 중에서 한쪽 매니퓰레이터(Fig. 1, 2)만을 고려한다. 본 실험에서는 관절 2, 4, 6만을 이용한다. 또한 매니퓰레이터 선단은 벽면에서 떨어진 상태에서 시작하여 $x-z$평면에 고정된 벽면에 접촉한 후 일정한 힘을 가하면서 이동하는 작업을 한다. 단, 관절 6은 매니퓰레이터 선단이 벽면에 $\pi/2$[rad]의 각도를 유지하도록 제어한다. 본 논문에서 사용하는 관절 각 θ와 링크 탄성변위 e는 다음과 같다.

$$\theta=[\ \theta_2\ \ \theta_4\ \ \theta_6],\quad e=[\ \delta_{y3}\ \ \delta_{z3}\ \ \delta_{y5}\ \ \delta_{z5}]$$

여기서 δ_{y3}, δ_{y5}, δ_{z3}, δ_{z5}는 각각 링크 3과 5의 y축과 z축 방향의 탄성변위를 나타낸다.

4.1 한 점 가중 실험

본 실험은 유연 매니퓰레이터의 선단이 $x-z$평면에 고정된 벽면에 x, z방향으로 위치 이동하지 않고 y방향으로 한 점을 계속해서 가중하는 작업을 수행한다.

먼저 첫 번째 실험(실험 I)은 힘센서로부터 계측된 접촉력 값을 이용해서 능동 컴플라이언스 제어를 수행하는 경우에 대해서 매니퓰레이터 선단의 접촉력, 위치의 거동을 조사한다. 초기위치는 (x, y, z)=(900㎜, 336㎜, 0㎜), 목표위치는 (x_d, y_d, z_d) = (900㎜, 346㎜, 0㎜), 가중 시간은 3초이다. y방향에는 램프 입력, x, z방향에는 일정입력을 부여한다. 샘플링 간격은 10[ms]로 설정한다. 이 실험에서 매니퓰레이터 선단의 목표 컴플라이언스 값 K^{-1}과 비례이득 K_{Xp}은 Table 2와 같이 설정한다.

두 번째 실험(실험 II)은 한 점 가중실험 I과 동일한 작업을 매니퓰레이터의 링크 탄성 정보로부터 계산되는 접촉력 값(6)을 이용해서 능동 컴플라이언스 제어를 수행하는 경우에 대해서 매니퓰레이터 선단의 접촉력, 위치의 거동을 조사한다. 실험 II은 실험 I과 동일하게 Table 2의 목표 컴플라이언스, 비례이득 값을 이용한다.

Table 2 Parameter of experiment

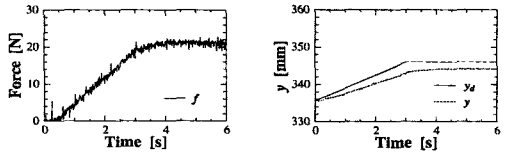
	K^{-1}[m/N]	K_{Xp}[s^{-1}]
실험 (a)	diag[0.0,0.1×10^{-3},0.0]	diag[4.0,4.0,4.0]
실험 (b)	diag[0.0,1.0×10^{-3},0.0]	diag[4.0,4.0,4.0]

4.2 x방향으로 이동 실험

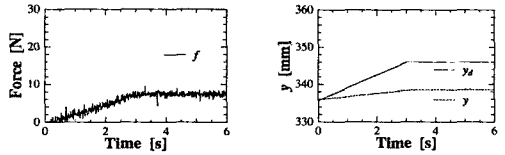
유연 매니퓰레이터의 선단이 $x-z$평면에 고정된 벽면에 대해서 x방향으로 위치 이동하면서 y방향으로 구속운동을 수행한다. 첫 번째 실험(실험 III)은 힘센서로부터 계측된 접촉력 값을 이용해서 능동 컴플라이언스 제어를 수행하는 경우에 대해서 매니퓰레이터 선단의 위치, 접촉력, 각 링크의 탄성변위의 거동을 조사한다.

초기위치는 (x, y, z)=(950㎜ , 342㎜, 0㎜), 목표위치는 (x_d, y_d, z_d)=(850㎜, 352㎜, 0㎜)이며 x방향은 램프 입력이다. 매니퓰레이터 선단의 초기 접촉력과 이동 속도를 각각 f= 10[N]와 50[㎜/s]로 설정한다. 매니퓰레이터 선단의 목표 컴플라이언스 값 K^{-1}= diag[0.0,1.0×10^{-3},0.0][m/N]과 비례이득 K_{Xp}= diag[4.0,4.0,4.0][s^{-1}]은 다음과 같이 설정한다.

두 번째 실험(실험 IV)은 실험 III과 동일 작업을 매니퓰

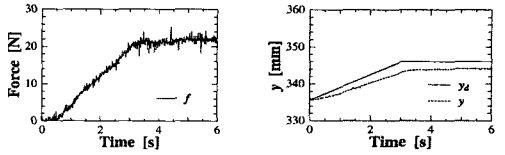


(a) $K^{-1}=\mathrm{diag}[0.0,0.1\times10^{-3},0.0]$

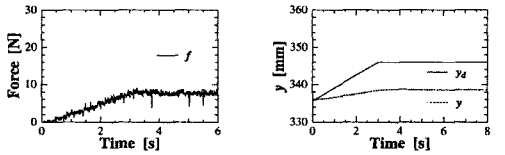


(b) $K^{-1}=\mathrm{diag}[0.0,1.0\times10^{-3},0.0]$

Fig. 4 Active compliance control for point (Experiment I)



(a) $K^{-1}=\mathrm{diag}[0.0,0.1\times10^{-3},0.0]$



(b) $K^{-1}=\mathrm{diag}[0.0,1.0\times10^{-3},0.0]$

Fig. 5 Active compliance control for point (Experiment II)

레이터의 링크 탄성 정보로부터 계산되는 접촉력 값을 이용해서 능동 컴플라이언스 제어를 수행하는 경우에 대해서 매니퓰레이터 선단의 접촉력, 위치의 거동을 조사한다. 실험 IV은 실험 III과 동일한 목표 컴플라이언스, 비례이득을 이용한다.

4.3 결과 고찰

Fig. 4와 5는 한 점 가중 실험(실험I, 실험II)에 대한 실험 결과이다. Fig. 4는 힘센서로부터 계측된 접촉력 값을 이용해서 능동 컴플라이언스 제어를 수행하는 경우에 대해서 매니퓰레이터 선단의 접촉력 및 위치의 응답 결과이다. Fig. 4의 실험(a)의 결과로부터 y방향의 위치 오차는 2.0[㎜], 접촉력은 21.0[N]이므로 매니퓰레이터 선단의 외견상의 컴플라이언스는

$$K^{-1}=\frac{2.0\times10^{-3}}{21.0}\simeq0.10\times10^{-3}[\mathrm{m/N}]$$

이며, 외견상의 컴플라이언스 값은 목표 값에 달성함을 알 수 있다. 또한 Fig. 4의 실험(b)의 결과로부터도 y방향의 위치 오차는 7.2[㎜], 접촉력은 7.5[N]이므로 매니퓰레이터 선단의 외견상의 컴플라이언스는 다음과 같이 계산되며,

$$K^{-1}=\frac{7.2\times10^{-3}}{7.5}\simeq1.0\times10^{-3}[\mathrm{m/N}]$$

이 결과로부터 실험(b)도 목표 컴플라이언스를 달성했음을 알 수 있다.

Fig. 5는 링크 탄성 변형으로부터 접촉력 값을 계산해서 능동 컴플라이언스 제어를 수행하는 경우에 대해서 매니퓰레이터 선단의 접촉력, 위치의 응답 결과이다. Fig. 5의 실험(a)의 결과로부터 y방향의 위치 오차는 2.0[㎜], 접촉력은 22.0[N]이므로 매니퓰레이터 선단의 외견상의 컴플라이언스 값은 0.09×10^{-3}[m/N]이며, 목표 컴플라이언스에 거의 달성됨을 알 수 있다. 또한 Fig. 5의 실험(b)의 결과로부터도 y방향의 위치 오차는 7.5[㎜], 접촉력은 8.0[N]이므로 매니퓰레이터 선단의 외견상의 컴플라이언스 값은 0.9×10^{-3}[m/N]이며, 목표 컴플라이언스에 거의 달성됨을 알 수 있다.

Fig. 4와 5의 실험 결과로부터 매니퓰레이터 선단의 외견상 컴플라이언스 K^{-1}값을 계산하여 비교하면 링크의 탄성 변위로부터 접촉력 값을 계산한 능동 컴플라이언스 제어 방법이 힘센서로부터 계측된 값을 이용한 방법보다 작게 검출됨을 알 수 있다. 이 결과의 이유로서는 링크의 탄성 변형을 이용하여 매니퓰레이터 선단의 접촉력을 산출하는 모델에 오차가 존재하기 때문이라 판단된다. 매니퓰레이터 선단이 $x-z$ 평면의 고정된 벽면에 접촉한 경우, 선단이 구속된 y 방향의 위치는 일정한 값을 유지하여야 한다. 그러나, Fig. 4(a)와 Fig. 5(a)의 실험 결과로부터 매니퓰레이터 선단이 벽면에 접촉 중임에도 불구하고 y방향으로 이동 즉, 벽면 내부로 이동함을 알 수 있으나, 실제는 고정된 벽면의 이동이 불가능함으로 강체 매니퓰레이터에서는 존재할 수 없는 상황이다. 이 결과로부터 약간의 위치 오차가 존재하여도 유연 매니퓰레이터의 구조적 특징인 탄성 변형으로 급격한

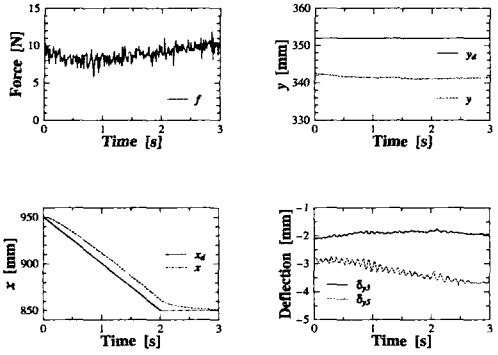


Fig. 6 Active compliance control with moving in x direction (Experiment III)

힘의 변화가 발생하지 않음을 알 수 있다.

Fig. 6와 7은 한 점 가중 실험(실험I, 실험II)에 대한 실험 결과이다. Fig. 6과 7의 실험 결과로부터 매니퓰레이터 선단의 외견상의 컴플라이언스 값이 목표 컴플라이언스에 달성됨을 알 수 있다. 또한 Fig. 6과 7의 실험 결과 비교하면 링크의 탄성변위로부터 접촉력 값을 산출하는 제어 방법이 힘센서로부터 계측된 값을 이용한 방법보다 링크의 탄성 진동이 작게 검출됨을 알 수 있다. Fig. 6에서 (a)는 힘센서로부터 계측된 접촉력 값, (b)는 링크 탄성 변형을 이용하여 계산한 접촉력 값을 나타내며, 이 결과로부터 두 접촉력은 일치함을 알 수 있다.

이 이유로서는 링크의 탄성변위로부터 접촉력 값을 산출하는 방법이 탄성변위와 접촉력의 대응 관계[8]에 의해서 매니퓰레이터의 능동 컴플라이언스를 제어함으로서 진동 억제 효과가 존재하기 때문이다.

5. 결 론

본 논문에서는 능동적인 컴플라이언스 제어를 속도입력형 서보 모터를 갖는 실험기 ADAM에 적용하기 위한 제어식을 유도하였으며, 이 식을 이용하여 매니퓰레이터 선단이 위치 이동하지 않는 경우와 이동하는 경우에 대한 능동적인 컴플라이언스 제어 실험을 수행하였다. 이 실험으로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째로 각 실험에 대한 매니퓰레이터 선단의 외견상 컴플라이언스 값을 계산하였으며 이 값으로부터 링크의 탄성변위로부터 접촉력 값을 계산한 능동 컴플라이언스 제어 방법

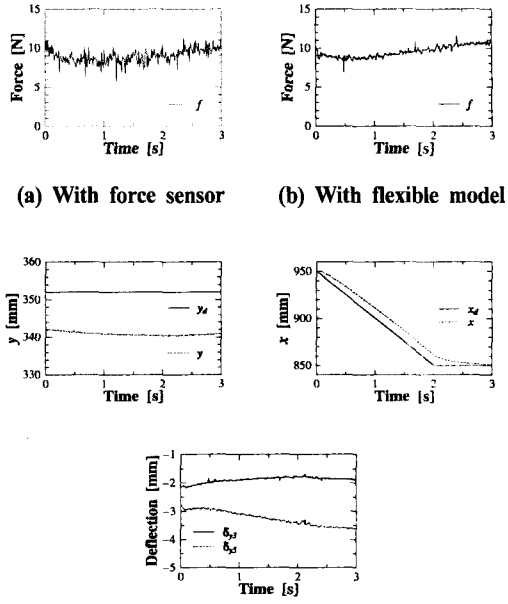


Fig. 7 Active compliance control with moving in x direction (Experiment IV)

이 힘센서로부터 계측된 값을 이용한 방법보다 외견상 컴플라이언스 값이 모델의 오차로 인해서 작게 검출됨을 보였다.

둘째로 Fig. 4(a)와 Fig. 5(a)의 y방향 위치 이동 실험 결과로부터 탄성 링크의 구조적인 컴플라이언스으로 인해서 매니퓰레이터 선단이 고정된 벽면에 접촉 중임에도 불구하고 벽면 내부로 이동함을 보였다. 이 결과로부터 일반적인 강체 매니퓰레이터에 있어서 서보 강성을 높이게 되면 매니퓰레이터와 작업환경을 손상시킬 수 있는 위험이 있으나, 유연 매니퓰레이터에 있어서 서보 강성 증가 및 접촉력의 급변을 탄성 링크의 구조적인 컴플라이언스를 이용하면 충격량을 흡수하여 완화시킬 수 있음을 알 수 있다.

셋째로 Fig. 6과 7의 실험 결과 비교하면 링크의 탄성변위로부터 접촉력 값을 산출하는 제어 방법이 힘센서로부터 계측된 값을 이용한 방법보다 링크의 탄성 진동이 작게 검출됨을 보였다. 유연 매니퓰레이터 선단 힘센서를 부착하여 접촉력을 제어하면 선단의 관성이 증가하여 더 큰 진동을 유발시키게 된다. 이러한 관점에서 구속받는 유연 매니퓰레이터의 경우, 매니퓰레이터의 위치, 속도, 가속도와 힘의 관계를 이용하여 매니퓰레이터의 선단 접촉력을 제어하는 것이 진동억제에 유효함을 보였다.

참 고 문 헌

(1) M.T. Mason, "Compliance and Force Control for Computer Controlled Manipulators", Trans. on Systems, Man and Cybernetics, Vol. SMC-11, pp. 418～432, 1981.

(2) M.H. Raibert and J.J. Craig, "Hybrid Position/Force Control of Manipulators", Trans. ASME, J. of Dynamic System, Measurement and Control, Vol. 103, No. 2, pp. 126～133, 1981.

(3) N. Hogan, "Impedance control. Part1-Part3", Trans. of ASME J. of Dynamic Systems, Measurement and Control, Vol. 107, pp. 1～24, 1985.

(4) W.J. Book, O.M. Neto and D.E. Whitney, "Feedback Control of Two Beam, Two Joint Systems with Distributed Flexibility", Trans. of ASME J. of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 101, No. 4. pp. 187～192, 1975.

(5) B.C. Chiou and M. Shahinpoor, "Dynamics Stability Analysis of a One-Link Force-Controlled Flexible Manipulator", J. Robotic Systems, Vol. 5, No. 5, pp. 443～451, 1988.

(6) 김진수, "유연 매니퓰레이터의 피동적인 힘제어에 관한 연구", 한국정밀공학회지, 제16권, 제10호, pp. 209-216, 1999.

(7) J.S. Kim and M. Uchiyama, "Dynamic Modeling of Two Cooperative Flexible Manipulators", KSME Int. Journal, Vol. 14, No. 2, pp. 186～196, 2000.

(8) 김진수, 内山 勝, "구속받는 3차원 유연 매니퓰레이터의 진동억제 제어", 한국정밀공학회지, 제17권, 제7호, pp. 189～195, 2000.

(9) 김진수, "여유자유도 유연 매니퓰레이터의 위치 제어", 한국공작기계학회논문집, Vol. 10, No. 3, pp. 83～89, 2001.

(10) M. Uchiyama, A. Konno, T. Uchiyama and S. Kanda., "Development of a Flexible Dual-Arm Manipulator Tested for Space Robotics", Proc. of the IEEE Int. Workshop on Intelligent Robotics and Systems'90, pp. 375-381, Tsuchiura, Japan, 1990.

(11) 杉本浩一, "ロボットアームの力フィードバック", 制御 計測と制御, Vol. 25, No. 1, pp. 45～50, 1988.