

〈논 문〉

## 공압매니플레이터의 임피던스제어를 위한 마찰보상법

박 정 규\*

(1996년 6월 11일 접수)

### Friction Compensation for Impedance Control of Pneumatic Manipulator

Jung-Gyu Park

**Key Words :** Friction Compensation(마찰보상법), Disturbance Observer(외란옵저버), Impedance Control(임피던스제어), Pneumatic Manipulator(공압매니플레이터), Inner Torque Control System(내부 토크제어계)

#### Abstract

In this paper, a friction compensation method using a disturbance observer is proposed for an impedance control of pneumatic manipulator. It is assumed that the generated torque by a pneumatic actuator can be estimated based on the pressure signals and the discharge volume. In order to improve the dynamic characteristics of the pneumatic actuator driven by meter out method, we construct the inner torque control system by feeding back the generated torque. In order to reduce the influence of disturbances comprising friction torque and parameter variations of plant, the impedance control system is constructed with a disturbance observer which estimates the disturbances based on the generated torque of pneumatic actuator, the angular velocity and the reaction torque. From some experiments, it is confirmed that the proposed control system is effective to improve the robustness for the friction torque in the impedance control of a pneumatic manipulator.

#### 1. 서 론

정비되어 있지않은 환경, 위치 및 형상 등이 미 지인 대상물과의 접촉작업에 응용할 것을 목적으로 하는 로봇은 대상물을 손상시키거나 로봇 자신에게 피해를 주지 않을 정도의 유연성을 가지고 접촉 대상물과 접촉할 필요가 있다. 유연한 접촉동작을 얻기 위해서는 매니플레이터 말단부(대상물과 접촉하는 부분)의 강성을 저하시키거나 대상물이 유연성을 가져야 한다. 대상물은 작업에 따라 다르게 항상 저강성만을 고집할 수 없기 때문에 로봇의 강성

을 저하시킬 필요가 있다. 로봇 말단부의 강성을 저하시키는 방법으로는 하드웨어적인 방법과 소프트웨어적인 방법을 생각할 수 있다.

하드웨어적인 방법으로 로봇 말단부를 저강성화시키기 위해서는, 고강성 액츄에이터(전동모터, 유압액츄에이터 등)와 기계적인 컴플라이언스를 가지는 팔에 의해 구성되는 플렉시블 매니플레이터를 생각할 수 있으며, 또 하나는 저강성 액츄에이터(공압액츄에이터 등)와 강체의 팔로서 구성되는 저강성 매니플레이터를 생각할 수가 있다. 플렉시블 매니플레이터의 저강성은 충돌력 등을 완화시키는 역할을 가지고 있으나 팔의 저강성에 기인하는 말단부의 진동억제가 주요 과제로 남아 있다.<sup>(1~3)</sup> 공압 액츄에이터에 의해 구동되는 저강성 매니플레이

\*회원, LG전자(주) 생산기술센터

터는 공기의 압축성에 기인하는 응답지연이 매니플레이터의 강성을 저하시킴으로 충돌력이 완화되어 유연한 접촉동작을 얻을 수 있으나 마찰력 및 부하 변동에 대하여 민감하게 되는 요인이 되므로 이러한 외란에 대하여 강인한 제어알고리즘이 요구된다. 또, 소프트웨어적으로 매니플레이터를 저장성화시키는 방법으로는 임피던스제어법이 알려져 있다.<sup>(4-6)</sup>

본 연구에서는 공압액츄에이터에 의해 구동되는 저장성 매니플레이터에 임피던스제어법을 적용하여 그 유효성을 검증한다. 공기의 압축성에 의해 저장성화되는 공압액츄에이터의 응답지연 및 액츄에이터가 발생하는 토크의 응답특성이 챔버의 체적에 의존하는 비선형성을 개선하기 위해서 공압액츄에이터의 이론적인 발생토크를 피드백하여 내부토크 제어계를 구성한다.<sup>(7)</sup> 다음으로 마찰토크 및 부하 변동 등의 외란에 대하여 강인한 임피던스제어계를 구성하기 위해서 액츄에이터의 발생토크, 각속도 및 반작용토크를 입력으로 하는 외란움저버를 구성한다.<sup>(8)</sup> 이 외란움저버는 매니플레이터가 대상물에 대하여 접촉/비접촉 운동을 반복하는 동안, 접촉시에는 각속도가 작기 때문에 마찰토크만을 추정하며, 비접촉시에는 마찰토크와 부하변동을 하나의 외란토크로 총합하여 추정하는 기능을 가지고 있다. 본 논문에서는 마찰토크에 대하여 저감도한 임피던스제어를 실현하기 위해서 내부 토크제어계와 외란움저버를 병용하는 토크 베이스형 임피던스제어계를 구성한다.

토크 베이스형 임피던스제어계를 공압매니플레이터에 적용하여, 매니플레이터가 대상물에 접촉한 상태 및 충돌과정에 있어서의 임피던스제어 실험을 통하여 그 유효성을 검증한다.

## 2. 제어계의 구성

### 2.1 내부 토크제어계

Fig. 1은 본 연구에서 사용한 Meter out 방식에 의해 구동되는 공압매니플레이터의 모델을 나타낸다. Vane type 액츄에이터의 한쪽 챔버에 일정한

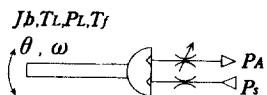


Fig. 1 Pneumatic drive circuit

압력  $P_B$ 를 공급하고, 다른쪽 챔버 내의 압축공기는 제어밸브의 개구면적을 변화시킴으로써 대기  $P_A$ 로 배출된다. 이러한 과정에 의해서 양 챔버에는 압력차  $P_L$ 이 발생하고 매니플레이터는 회전하게 된다. Vane이 중앙에 정지해 있는 상태를 기준 상태로 하여 선형화한 챔버 내부의 상태방정식은 다음 식으로 표시된다.<sup>(7, 8)</sup>

$$(T_{as} + 1)P_L(s) = K_a u(s) - K_a K_v \omega(s) \quad (1)$$

$$T(s) = D P_L(s) \quad (2)$$

여기서,  $T_a$ ,  $K_a$ ,  $K_v$ 와  $D$ 는 각각 공압액츄에이터의 시정수, 제어입력  $u(s)$ 를 압력  $P_L(s)$ 의 차원으로 변환하는 계수, 각속도  $\omega(s)$ 가 압력에 미치는 영향을 제어입력의 차원으로 환산하는 계수 및 액츄에이터의 토출용적이며, 본 연구에서는 토출용적은 기지상수로 가정한다.  $T(s)$ 는 기지인 토출용적과 압력센서의 정보에 의해 구해지는 양 챔버의 압력차에 의해 추정되는 공압액츄에이터의 이론적인 발생토크이다.

구동부의 운동방정식과 대상물의 모델은 다음 식으로 나타내어진다.

$$(Js + b)\omega(s) = T(s) - T_f(s) - T_L(s) \quad (3)$$

$$T_L(s) = K_e \theta_e(s) \quad (4)$$

여기서,  $J$ 와  $b$ 는 관성모멘트와 점성마찰계수,  $T_f(s)$ 는 마찰토크이며, 정지 및 Coulomb 마찰토크를 포함한다.  $\theta_e(s)$ 는 회전각의 변화량,  $T_L(s)$ 는 팔의 말단부가 대상물에 접촉했을 경우의 반작용토크,  $K_e$ 는 힘센서의 특성을 포함하는 대상물의 등가강성을 나타낸다.

Meter out 방식에 의해 구동되는 공압액츄에이터는 소비 에너지가 작은 점 등의 이점이 있으나, 비선형성(챔버의 체적에 따라 액츄에이터 발생토크의 응답성이 다르며 액츄에이터가 발생하는 최대토크는 공급압력에 기인하는 일정치에 접근하는 것 등) 및 공기의 압축성에 기인하는 압력의 응답지연 등의 결점이 있다.<sup>(7)</sup>

이러한 결점을 개선하기 위해서, Fig. 2에서 나타내는 것처럼 액츄에이터의 이론적인 발생토크를 피드백하여 비례제어계를 구성한다. 본 논문에서는 이것을 내부 토크제어계라고 부르고 있다.<sup>(7, 8)</sup> 제어입력은 다음 식에 의해 계산된다.

$$u(s) = K_{pa} \{ T_r(s) - T(s) \} \quad (5)$$

여기서,  $K_{pa}$ 와  $T_r(s)$ 는 내부 토크제어계의 비례

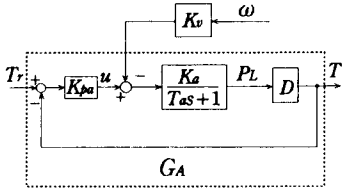


Fig. 2 Inner torque control system

이득값과 목표토크를 나타낸다. 식 (5)를 식 (1)에 대입하여 정리하면 액츄에이터의 이론적인 발생토크는 다음 식으로 표시된다.

$$(T_{As} + 1) T(s) = K_m T_r(s) - \frac{K_m K_v}{K_{pa}} \omega(s)$$

$$T_A = \frac{T_a}{1 + K_a D K_{pa}}$$

$$K_m = \frac{K_a D K_{pa}}{1 + K_a D K_{pa}} \quad (6)$$

$K_{pa}$ 를 크게 설정하면 할수록 공압액츄에이터의 특성은  $K_m=1$ 으로 되며,  $T_A$ 가 작은 선형 1차 지연시스템으로 변형된다. 그리고 내부 토크제어계에 대해서 외란으로 작용하는 각속도의 영향 또한 감소된다.

2.2 외란움저버의 구성

구동부 파라미터의 공칭치와 그 변화량의 관계는 다음 식으로 표시된다.

$$J = J_n + \Delta J, \quad b = b_n + \Delta b \quad (7)$$

여기서, 첨자  $n$ 은 각 파라미터의 공칭값,  $\Delta$ 은 각 파라미터의 변화량 혹은 모델화 오차를 나타낸다.

식 (7)을 식 (3)의 좌변에 대입하여 기지의 항과 미지의 항으로 분리하여 정리하면, 다음과 같다.

$$(J_n s + b_n) \omega(s) = T(s) - T_L(s) - T_{dis}(s) \quad (8)$$

여기서,  $\omega(s)$ 는 로터리 엔코더의 정보를 수치미분하므로써 구할 수 있으며,  $T(s)$ 는 식 (2)에 의해서,  $T_L(s)$ 은 힘센서로부터 측정되는 반작용력 정보와 팔의 길이로서 구할 수 있으므로 미지의 항은  $T_{dis}(s)$ 뿐이며, 다음 식으로 정의된다.

$$T_{dis}(s) = T_I(s) + (\Delta J s + \Delta b) \omega(s) \quad (9)$$

본 논문에서 정의한 외란토크는 비접촉시에는 상기 식과 같은 외란토크이나, 관성모멘트와 점성마찰계수를 파라미터동정법 등을 사용하여 추정하며,

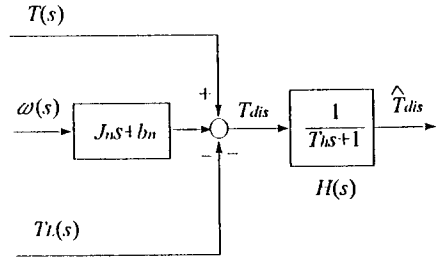


Fig. 3 Disturbance observer

그 변화량이 작다고 가정하면, 매니플레이터가 대상물에 접촉하여 힘을 제어할 경우는 각속도가 작으므로 우변의 제2항은 무시해도 좋을 정도로 작게 되므로 마찰토크만이 외란으로 남게 된다. 이것이 본 논문에 있어서의 특징이라고 할 수 있다. 매니플레이터가 대상물에 접촉/비접촉(힘/위치제어)을 반복함에도 불구하고 하나의 외란움저버를 사용하여 외란을 추정하고 이를 피드백 보상하므로써 마찰력에 대하여 강한 임피던스제어를 가능하게 한다.

식 (8)에 있어서 우변의 미지항을 좌변으로 이항시키서 정리하면 식 (9)에서 정의한 외란을 추정하는 외란움저버가 구성된다.

$$T_{dis}(s) = T(s) - (J_n s + b_n) \omega(s) - T_L(s) \quad (10)$$

우변 제 2항이 Improper이기 때문에 그대로는 외란을 추정할 수가 없다. 그래서 적어도 1차 이상의 Lowpass filter  $H(s)$ 를 삽입하여 Proper항으로 바꾸어야 한다. 따라서 외란토크는 다음 식에서 나타낸 것같이  $\hat{T}_{dis}(s)$ 로서 추정된다.

$$\hat{T}_{dis}(s) = H(s) T_{dis}(s) \quad (11)$$

식 (10)과 식 (11)에 의해 구성되는 외란움저버는 Fig. 3과 같이 구성된다. 이 움저버는 매니플레이터가 대상물에 접촉하지 않을 경우에는 반작용토크가 발생하지 않기 때문에 액츄에이터의 발생토크와 각속도를 입력으로 하여 외란을 추정한다. 그리고 고강성의 대상물과 접촉시에는 각속도는 무시해도 좋을 정도로 작기 때문에 액츄에이터의 발생토크와 반작용토크를 입력으로 하여 외란을 추정하게 되는 특징을 가진다.

2.3 임피던스제어계

임피던스제어계는 위치 베이스형과 토크 베이스형으로 분류되며,<sup>(10)</sup> 본 연구에서는 액츄에이터의

특성을 개선하기 위해서 Fig. 2의 내부 토크제어계를 구성하고 있으므로 토크 베이스형 임피던스제어계를 구성한다. 위치제어 루프내의 토크제어계에 부여되는 목표토크  $T_{cr}(s)$ 은 다음 식에 의해 구할 수 있다.

$$T_{cr}(s) = G_r(s) \{ \theta_r(s) - \theta(s) \} \quad (12)$$

여기서,  $G_r(s)$ 는 관절의 목표임피던스를 나타내고,  $\theta_r(s)$ 는 관절의 목표각이다. 이하에서는 표현을 간단하게 하기 위하여 다음 식에서 정의한 전달함수를 사용한다.

$$\begin{aligned} A(s) &= \frac{K_a D}{T_a s + 1} \\ G_A(s) &= \frac{K_m}{T_A s + 1} \\ P(s) &= \frac{1}{J s + b} \\ P_n(s) &= \frac{1}{J_n s + b_n} \\ H(s) &= \frac{1}{T_h s + 1} \end{aligned} \quad (13)$$

여기서,  $A(s)$ 는 공압액추에이터의 모델,  $G_A(s)$ 는 내부 토크제어계에 의해 변형된 공압액추에이터의 모델,  $P(s)$ 는 구동부의 모델,  $P_n(s)$ 는  $P(s)$ 의 공칭 모델을 나타내며,  $T_h$ 는 Lowpass filter  $H(s)$ 의 시정수이다.

Fig. 4는 위치제어 루프내에 반작용 토크(측정치)를 피드백 하여 토크제어계를 구성한 임피던스 제어제이며, 본 논문에서는 이것을 종래의 토크 베이스형 임피던스제어계라고 부르고 있다. 여기서는 Fig. 2와 같은 내부 토크제어계는 구성하지 않는다.  $C$ 는 토크 컨트롤러이다. 위치제어 루프 내부의 토크제어계의 페루프 전달함수  $G_t(s)$ 는 다음 식으로 표현된다.

$$\begin{aligned} G_t(s) &= \frac{T_L(s)}{T_{cr}(s)} \\ &= \frac{K_e P(s) A(s) C(s)}{\{1 + P(s) A(s) K_e\} s + K_e P(s) \{1 + A(s) C(s)\}} \end{aligned} \quad (14)$$

매니플레이터가 대상물에 접촉했을 때에 반작용 토크  $T_L(s)$ 과 위치오차  $\theta_r(s) - \theta(s)$ , 마찰토크  $T_f(s)$ 와의 관계는 다음 식으로 표시된다.

$$\frac{T_L(s)}{\theta_r(s) - \theta(s)} = G_t(s) G_r(s) \quad (15)$$

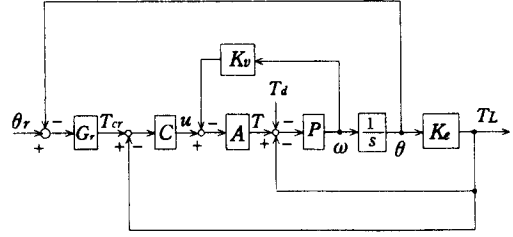


Fig. 4 Torque based impedance control system using usual method

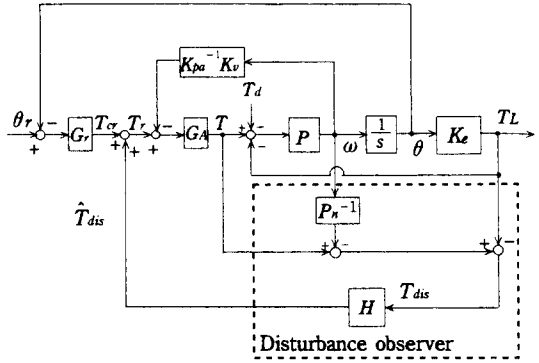


Fig. 5 Impedance control system using disturbance observer

$$\frac{T_L(s)}{T_r(s)} = \frac{-G_t(s)}{A(s)C(s)} \quad (16)$$

$|G_t(j\omega)| = 1$ 를 만족하는 주파수 영역에 있어서 목표 임피던스  $G_r(s)$ 는 실현된다. 마찰토크의 영향 또한 컨트롤러에 의해 감소시킬 수 있다. 그래서 양자를 동시에 만족할 수 없기 때문에 Trade off가 필요하다.

Fig. 5는 Fig. 2의 내부 토크제어계와 Fig. 3의 외란움저버를 병용하는 임피던스제어계이며, 본 논문에서는 이것을 외란움저버를 가진 임피던스제어계라고 부른다. 위치제어 루프 내의 토크제어계, 즉 내부 토크제어계에 부여되는 목표토크  $T_{cr}(s)$ 로부터 반작용토크  $T_L(s)$ 까지의 전달함수  $G_{ob}(s)$ 는 다음과 같이 부여된다.

$$\begin{aligned} G_{ob}(s) &= \frac{T_L(s)}{T_{cr}(s)} \\ &= \frac{K_e P(s) G_A(s)}{\{1 - G_A(s) H(s) + \frac{G_A(s) P(s) K_v}{K_{pa}}\} s + K_e P(s) \{1 + \frac{G_A(s) P(s) H(s)}{P_n(s)}\}} \end{aligned} \quad (17)$$

$G_{ob}(s)$ 를 도입하여 외란옵저버를 가진 제어계의 전달함수를 나타내면, 다음과 같다.

$$\frac{T_L(s)}{\theta_r(s) - \theta(s)} = G_{ob}(s) G_r(s) \quad (18)$$

$$\frac{T_L(s)}{T_r(s)} = \frac{-G_{ob}(s) \{1 - G_A(s)H(s)\}}{G_A(s)} \quad (19)$$

위의 식에서 알 수 있듯이 마찰토크의 영향을 제거하기 위해서 필터  $H(s)$ 는 다음 식을 만족하도록 설정해야 한다.

$$|1 - G_A(j\omega)H(j\omega)| = 0 \quad (20)$$

이 식을 만족하는 주파수 범위내에서의  $G_{ob}(s)$ 는 다음 식으로 나타내어지고, 부하변동의 영향도 제거된다.

$$G_{ob} = \frac{G_A(s)}{\left\{ \frac{G_A(s)K_e}{K_{pa}} + \frac{G_A(s)H(s)}{P_n(s)} \right\} \frac{s}{K_e} + 1} \quad (21)$$

$K_e \rightarrow \infty$ 의 경우, 분모의 제 1항은 무시할 수가 있으므로 외란옵저버를 가진 임피던스제어계는  $G_A(s)$ 의 밴드폭(band width) 내에서 목표 임피던스가 실현된다. 이처럼 Fig. 5의 제어계에 있어서 외란 억압특성은 필터  $H(s)$ 에 의해, 목표임피던스의 실현 가능한 범위는 내부 토크제어계에 의해 변형된 액츄에이터의 특성에 따라 독립적으로 조정 가능한 이점을 가지고 있다.

### 3. 공압매니플레이터

Fig. 6은 Meter out 방식에 의해 구동되는 공압 매니플레이터의 제어회로를 나타낸다. 제어입력  $u$

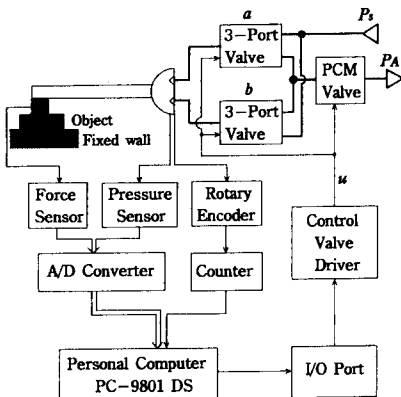


Fig. 6 Control circuit

는 Vane type 공압액츄에이터 내의 압축공기를 조절하는 PCM(Pulse Code Modulation)밸브를 개폐함과 동시에 그 부호는 공압매니플레이터의 회전 방향을 제어하기 위한 3 port 전자밸브의 구동에 사용된다. PCM밸브는 ON-OFF밸브의 개구 면적비가  $S_1 : S_2 : \dots : S_n = 2^0 : 2^1 : \dots : 2^{n-1}$ 를 유지하도록 유효단면적을 조절하여 다음 식과 같은 비를 유지하도록 병렬접속하여 구성한다.

$$S_1 : S_2 : S_3 : S_4 : \dots = \frac{1.2}{32} : \frac{1.2}{16} : \frac{1.2}{8} : \frac{1.2}{4} : \dots \quad (22)$$

이것은 유효단면적이 1.2 mm<sup>2</sup>인 ON-OFF밸브를 사용하여 PCM밸브를 구성한 경우의 예를 나타낸 것이다. 본 논문에서는 6개의 ON-OFF밸브를 병렬접속하여 PCM밸브를 구성하였기 때문에, 2<sup>6</sup> 단계의 속도조절이 가능하다. 대상물에 접촉력을 가하기 위해서는,  $b$ 의 3 Port 전자밸브를 ON으로 하고 일정압력  $P_s$ 를 한쪽의 챔버에 공급함과 동시에,  $a$ 의 3 Port 전자밸브를 OFF으로 하여, 다른 쪽 챔버와 PCM밸브를 연결시켜 챔버 내의 압축공기를 대기로 배출한다. 이 과정에 의해 매니플레이터가 회전하여 대상물에 힘을 가하게 된다. 3 Port 전자밸브는  $u < 0$ 일 경우에  $a=1, b=0$ 으로 되고, 그 외의 경우에는  $a=0, b=1$ 이 되도록 조절하였다.

공압매니플레이터의 회전각도를 피드백하여 위치 제어계를 구성할 수 있도록 분해능(resolution)이  $1.56 \times 10^{-4}$ rad인 로터리 엔코더를 회전축에 고정했다. 공압액츄에이터의 양챔버에는 분해능이 0.234 kPa인 압력센서를 장착하여 공압액츄에이터 내의

Table 1 Parameters of nominal model and gains of controller

$K_{pa}$	1/Nm	15
$K_{pf}$	1/Nm	9
$K_p$	Nm/rad	10, 20
$K_d$	Nm·s/rad	0.5
$J_n$	Nm·s <sup>2</sup> /rad	0.04
$b_n$	Nm·s/rad	0.35
$T_h$	s	0.05

압력변화를 검출한다. 또, 분해능이 0.03 N인 힘 센서를 매니플레이터 (0.15 m)의 말단부에 부착시켜서 반작용토크를 검출한다. 대상물로서는 강성이 670 Nm/rad인 고무를 고정된 벽에 부착시킨다. 공급압력은  $P_s=490$  kPa이고, 제어시의 샘플링주기는 7.7 ms이다.

Table 1은 본 연구에서 사용한 제어계의 파라미터 값과 외란오퍼저버를 구성하는데 사용한 공칭모델 값을 나타낸다. 또한, 목표임피던스는  $G_r(s)=K_d s + K_p$ 으로 설정했으며, Lowpass filter는  $H(s)=\frac{1}{1+T_{fs}s}$ 으로 설정하여 실험을 실시했다.

### 4. 실험에 의한 고찰

Fig. 7은 매니플레이터, 힘센서 및 대상물의 관계를 나타낸다. 접촉 대상물인 고무를 고정된 벽에 고정하였고, 매니플레이터의 말단부에 부착한 힘센서는 이와 직각으로 접촉한다. 말단부가 대상물로부터 떨어질 경우에는 위치제어, 접촉할 경우에는 목표임피던스와 위치오차에 의해 생성되는 목표토크에 추종하는 토크제어를 행하게 된다.

#### 4.1 외란토크 추정

Fig. 8은 외란오퍼저버의 성능을 조사하기 위해서 행한 실험결과이며, Fig. 5의 제어계에 정현파 목표입력  $\theta_r=0.5 \sin(0.5 \pi t)$ 를 부여하였을 때 Fig. 3의 외란오퍼저버에 의해 추정된 외란토크의 응답을 나타낸다. 이때에 추정된 외란토크는 내부 토크 제어계의 목표토크에 피드백 보상을 행하지 않는다. 목표임피던스는  $G_r(s)=0.5s+10$ , 내부 토크

제어계의 비례이득값은  $K_{pa}=151$ /Nm으로 설정했다. 매니플레이터는 Fig. 7의 상태에서부터 2초마다 비접촉/접촉운동을 반복한다. 외란오퍼저버는 매니플레이터가 비접촉/접촉운동을 반복하고 있음에도 불구하고 추정된 외란토크는 마찰토크의 크기에 상당하는 외란을 추정하고 있다고 볼 수 있다. 매니플레이터가 비접촉운동을 행할 경우(0~2, 4~6s), 외란오퍼저버는 식 (9)에서 정의한 외란을 추정하고 있다. 여기서는 매니플레이터의 파라미터 변동은 일어나고 있지않다고 가정하면, 외란오퍼저버는 마찰토크와 파라미터의 동정오차를 포함하는 것에 Lowpass Filter의 특성이 추가된 외란을 추정한다. 또, 매니플레이터가 대상물에 접촉하는 구간(2~4, 6~8s)에서는 대상물이 고강성이라면 각속도  $\omega(s)$ 는 무시해도 좋을 정도로 작게되므로 외란오퍼저버는 마찰토크만을 추정하게 된다. 정현파의 목표각을 입력하고 있으므로 매니플레이터가 대상물에 충돌하는 순간은 각도오차가 작고 시간이 지나면 지날수록 오차가 크게 되어 반작용토크는 증대한다. 피크가 발생한 후, 반작용토크는 감소를 시작하여 매니플레이터가 대상물과의 접촉상태에서 벗어나게 된다. 이와 같이 매니플레이터의 운동방향이 변화할 때에 마찰토크도 Fig. 8에서 나타낸 것처럼 그 방향이 바뀌게 된다. 반작용토크가 감소하는 구간(Fig. 10의 반작용토크 응답을 참조)에 상당하는 시각 3~4, 7~8s에서는 추정 외란토크가 급격히 변동하는 현상이 일어난다. 이것은 Meter out방식 고유의 문제이며 제어입력의 부호가 바뀌는 것에 의해 압축공기의 공급방향을 제어하는 3포트 전자밸브가 절환되므로 생기는 현상이다.<sup>(11), (12)</sup>

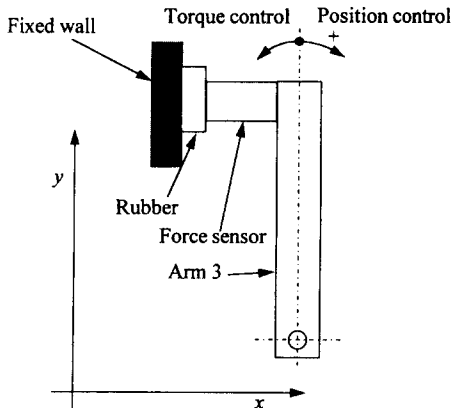


Fig. 7 Relations of pneumatic manipulator

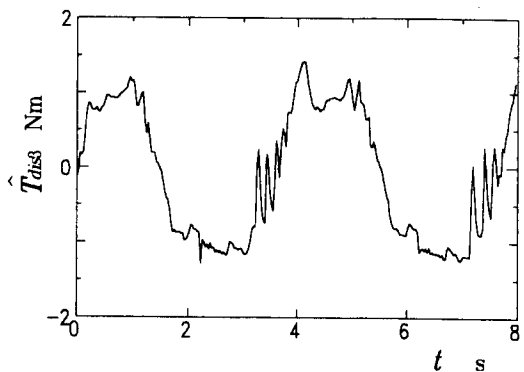


Fig. 8 Estimated disturbance torque when reference angle is sinusoidal wave

4.2 반작용토크 제어

Fig. 9는 Fig. 4의 제어계와 Fig. 5의 제어계에 계단상의 목표입력을 부가하여 임피던스제어를 행한 경우의 반작용토크 응답을 나타낸다. Fig. 7의 상태에 있어서 각 제어계의 목표각  $\theta_r = -0.5$  rad를 인가하고 대상물로서는 등가강성  $K_e = 670$  Nm/rad의 고무를 고정하였다. Fig. 4에 있어서 토크컨트롤러의 비례 이득값은  $K_{pr} = 91$  /Nm, Fig. 5에 있어서의 내부 토크제어계의 비례 이득값은  $K_{pa} = 15$  1/Nm를 부여했다. 목표임피던스는  $G_r = 0.5s + 10$ 로 설정했다. 가는 파선은 위치제어 루프 내의 토크제어계에 부여되는 목표토크  $T_{cr}$ 이며, 식 (12)에서 나타낸 것같이 위치오차와 목표임피던스를 가지고 생성한 것이다. 굵은 파선은 Fig. 4의 제어계에 의한 반작용토크의 응답이며, 상당히 늦은 응답 특성을 보이고 있다. 가는 실선은 Fig. 5의 제어계에 있어서  $H(s) = 0$ 로 설정하여 외란옵저버에 의해 추정되는 외란토크를 피드백 보상하지 않는 제어계의 응답특성이다. 내부 토크제어계에 의해 액추에이터의 응답특성이 개선되었기 때문에 반작용토크의 응답성은 Fig. 4의 제어계보다 양호하나 마찰토크의 영향에 기인하는 정상편차를 남기고 있다. 굵은 실선은 Fig. 5의 제어계에 있어서 내부 토크제어계의 목표토크  $T_c$ 에 외란옵저버에 의해 추정된 외란토크를 보상하고 있기 때문에 정상편차가 작은 반작용토크의 응답을 얻고 있다. 이것으로부터 본 논문에서 제안한 Fig. 5의 제어계는 내부 토크제어계에 의해 액추에이터의 응답특성을 개선하고 외란옵저버에 의해 마찰토크의 영향을 보상하는 특징이 있음을 확인할 수 있다.

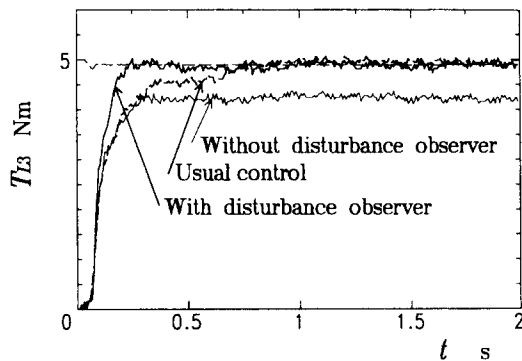


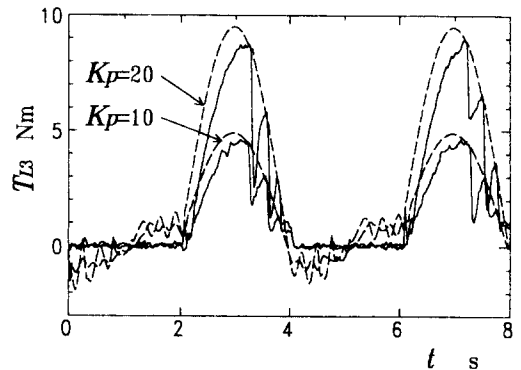
Fig. 9 Response of reaction torque when reference angle is step input

4.3 충돌과정 제어

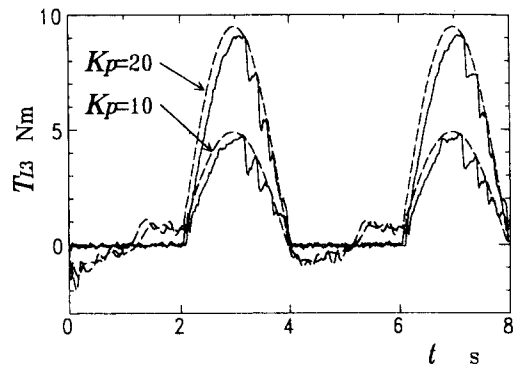
매니플레이터가 대상물과 충돌하는 충돌과정의 제어는 Fig. 7에서 나타낸 것같이 매니플레이터가 대상물과 접촉하고 있는 상태에서 실시한다. Fig. 4와 Fig. 5의 제어계에 정현파 목표입력  $\theta_r = 0.5 \sin(0.5 \pi t)$  rad를 인가했다. 각각의 컨트롤러 이득값은 Fig. 9에서와 동일하게 설정했다.

Fig. 10은 매니플레이터가 대상물에 접촉했을 때에, 즉 시각 2~4, 6~8s에 있어서 위치오차와 목표임피던스를 가지고 생성한 목표토크에 반작용토크가 추종할 수 있도록 토크제어를 행한 경우의 결과이다.

점선은 식 (12)에 의해 생성한 위치제어 루프 내의 토크제어계에 부여하는 목표토크를 나타내고 실선은 반작용토크의 응답을 나타낸다. 진폭이 작은 것은 목표임피던스를  $G_r = 0.5s + 10$ , 진폭이 큰 것은  $G_r = 0.5s + 20$ 로 설정했을 경우의 목표토크와 각 제어계에 의한 반작용토크의 응답을 나타낸다.



(a) In the case of Fig. 4



(b) In the case of Fig. 5

Fig. 10 Response of reaction torque when reference angle is sinusoidal wave

(a)에서는 반작용토크가 감소할 경우에 꽤 진폭이 큰 진동적인 응답을 얻고 있다. (b)에서는 진폭이 작은 반작용토크 응답을 얻고 있다. Fig. 5의 제어계는 반작용토크가 감소할 때에 그 응답이 진동적인 현상을 나타내는 것은 Meter out 방식 특유의 문제<sup>(11, 12)</sup>를 완화하고 있는 것을 확인할 수 있다. 이것은 Fig. 9에서 나타낸 것같이 Fig. 5의 내부 토크제어계에 의해 공압액추에이터의 응답특성을 개선하였기 때문에 반작용토크가 신속하게 목표토크에 추종하는 것에 기인하는 결과이다. 또, 반작용토크가 증가할 경우, (a)의 응답에 비교하여 응답 지연도 개선되었다. 이 결과에 의해 Fig. 5의 제어계는 Fig. 4의 제어계와 비교하여 공압매니플레이터의 임피던스제어에 유리하다는 것을 알 수가 있다. 매니플레이터가 대상물에 충돌할 때에 생기는 충돌토크는 양 제어계 모두 작다. 이것은 공기의 압축성에 의해 충돌력이 완화되었기 때문이다.

4.4 목표임피던스의 실현

Fig. 11은 정현파상의 목표입력의 주파수를 바꾸어 가면서 그때에 발생하는 위치오차와 반작용토크의 비를 나타낸 것이다. 실험은 Fig. 10과 같이 동일한 조건이며 목표임피던스는  $G_r=2s+10$ 로 설정하였다. 실선은 목표임피던스의 특성을 나타내고 검은 색으로 채워진 원은 Fig. 4의 제어계, 원으로 나타내고 있는 것은 Fig. 5의 제어계에 의해 실현된 임피던스를 나타내고 있다. Fig. 5의 제어계는 Fig. 4의 제어계에 비하여 저주파수 영역에서는 목표임피던스에 잘 추종하고 있으나 고주파수 영역에서 급격히 그 추종특성이 저하되고 있다. 이것은 Fig. 2에서 구성한 내부 토크제어계의 응답특성에 기인한 것으로 사료된다. 따라서 본 논문에서 구성한 임피던스제어계(Fig. 5)는 낮은 주파수 영역에

서 임피던스제어를 실시할 경우에 그 효과를 발휘한다.

5. 결 론

본 논문에서는, Vane type 공압액추에이터의 응답특성을 개선하기 위해서 액추에이터의 발생토크를 피드백하여 내부 토크제어계를 구성하였다. 또 마찰토크에 대하여 강인한 임피던스제어계를 구성하기 위하여 액추에이터의 발생토크, 각속도 및 반작용토크를 입력으로 하는 외란오프저버를 구성했다. 이 오프저버는 마찰토크 및 부하변동을 하나의 외란으로 총괄하여 추정하는 기능을 가지고 있으며, 추정된 외란토크를 내부 토크제어계의 목표토크에 피드백 보상함으로써 외란의 영향을 감소시킨다. 내부 토크제어계와 외란오프저버를 병용하는 토크 베이스형 임피던스제어계는 통상의 토크 베이스형 임피던스제어계에 비하여 다음과 같은 이점을 가지고 있다는 것을 실험을 통하여 검증하였다.

- (1) 내부 토크제어계에 의해 공압 액추에이터의 응답특성 및 반작용토크의 속응성을 조절할 수 있다.
- (2) 외란오프저버는 접촉시에 마찰토크를, 비접촉시에 마찰토크와 부하변동을 추정할 수 있는 특성을 가지고 있다.
- (3) 제안한 임피던스제어계는 실현 가능한 임피던스의 특성조절에는 내부 토크제어계, 외란 억압 특성에는 외란오프저버를 사용하고 있으므로 독립적으로 양 특성을 조절할 수 있다.
- (4) 충돌과정 제어에 있어서 공기의 압축성에 의해 충돌력이 완화된다는 것을 확인하였다.

참고문헌

- (1) 福田, 1988, “フレキシブルアームの研究動向,” 日本ロボット學會誌, Vol. 6, No. 5, pp. 424~429.
- (2) 吳, 下山, 三浦, 1988, “三次元宇宙用マニピュレータの一手法,” 日本ロボット學會誌, Vol. 6, No. 5, pp. 388~392.
- (3) 小松, 植之原, 三浦, 下山, 1990, “2リンク柔軟マニピュレータのコンプライアンス制御,” 日本機械學會論文集(C編), Vol. 56, No. 530, pp. 2642~2648.

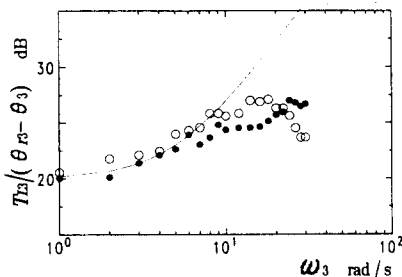


Fig. 11 Realization of desired impedance



- (4) Hogan, N., 1985, "Impedance Control: An Approach to manipulator-Part 1, Part 2 and Part 3," *ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, Vol. 107, pp. 1~24.
- (5) Hogan, N., 1987, "Stable Execution of Contact Tasks Using Impedance Control," *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1047~1054.
- (6) McCormick, W. and Schwartz, H. M., 1993, "An Investigation of Impedance Control for Robot Manipulators," *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 12, No. 5, pp. 473~489.
- (7) 則次, 朴, 1994, "壓力情報に基づく空気圧マニピュレータの力制御," *ロボティクス・メカトロニクス講演會 '94論文集*, Vol. B, pp. 1069~1074.
- (8) Noritsugu, T. and Park, J. G., 1994, "Friction Compensation in Pneumatic Manipulator Using Disturbance Observer," *Proceedings of the 2nd Japan-France Congress on Mechatronics (International)*, Vol. 2, pp. 715~718.
- (9) 則次, 1993, "空気圧シリングの制御特性," *油圧と空気圧*, Vol. 24, No. 7, pp. 775~780.
- (10) Lawrence, D. A., 1988, "Impedance Control Stability Properties in Common Implementation," *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1185~1190.
- (11) 則次, 朴, 1994, "外亂オブザバを用いた空気圧マニピュレータの力制御," *日本ロボット學會誌*, Vol. 13, No. 5, pp. 711~719.
- (12) 박정규, 노리츠크 토시로, 1996, "공압 매니플레이터의 강인 힘제어," *대한기계학회논문집*, Vol. 20, No. 2, pp. 540~552.