

< 논 문 >

공압 매니플레이터의 강인 힘제어

박정규* · 노리츠크 토시로**

(1995년 7월 29일 접수)

Robust Force Control of Pneumatic Manipulator

Jung-Gyu Park and Toshiro Noritsugu

Key Words : Robust Control(강인제어), Disturbance Observer(외란 옵저버), Force Control(힘제어), Pneumatic Manipulator(공압 매니플레이터), Inner Torque Control System(내부 토크제어계)

Abstract

In this paper, a compensation method of disturbance using a disturbance observer is proposed for a force control of a pneumatic robot manipulator. The generated torque by a pneumatic actuator can be estimated based on the pressure signals. The inner torque control system is constructed by feeding back the generated torque to improve the dynamic characteristics of the actuator. In order to reduce the influence of disturbances comprising friction torque, parameter variations of plant and environment and so on, the reaction torque control system is constructed with a disturbance observer which estimates the disturbances based on the reference input to the inner torque control system and the reaction torque sensed with a force sensor. Form some simulations and experiments, it is confirmed that the proposed control system is effective to improve the robustness for the friction torque and the parameter change of object in the force control of a pneumatic robot manipulator.

1. 서 론

로봇 매니플레이터를 조립 및 연마 등의 접촉작업에 이용하기 위해서는, 로봇이 대상물의 형상 및 위치를 변화시키지 않을 정도의 유연성을 가지고 대상물에 접촉하는 것이 바람직하다. 이와 같은 접촉작업에 응용할 것을 목적으로 하는 로봇은 하드웨어적으로 말단부의 강성을 저하시키거나, 소프트웨어적으로 접촉력을 제어할 수 있는 기능이 필요하다. 저장성 로봇으로서, 공압 액추에이터에 의해 구동되는 공압 로봇이 있으며, 이것은 공기의

압축성에 의한 충돌력 완화 및 안정한 접촉상태를 유지하는 것에 유효하기 때문에 미지의 대상물과의 접촉작업에 그 응용이 기대된다.⁽¹⁾

공압 로봇은 공기의 압축성에 의해 저장성화되기 때문에 힘제어에는 유리하나, 고정도(high accuracy)의 위치제어에는 불리하다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 참고문헌 (2), (3)에서는 위치제어부에 슬라이딩모드 제어(sliding mode control)를 적용하고 힘제어부에는 고전적인 PI 제어를 가진 위치와 힘의 하이브리드제어제(hybrid control system)를 구성하고 있다. 슬라이딩모드제어에서 항상 문제시되고 있는 떨림현상(chattering)은 압력의 피드백 보상으로 감소시키고 있다. 공압 로봇의 말단부가 대상물의 표면을 따라가는 실험을

*회원, LG전자(주) 생산기술센터 기술개발연구소

**일본 오카야마국립대학교 공학부 기계공학과

통하여 슬라이딩모드 제어법을 가진 위치와 힘의 하이브리드 제어계의 유효성 및 문제점을 지적하고 있으며, 공압 로봇을 접촉작업에 응용할 수 있다는 가능성을 제시하고 있다. 공기의 압축성은 공압 서보의 강성(stiffness)을 저하시키기 때문에, 마찰력 및 부하외력 등을 포함하는 외란의 영향에 민감하다. 그렇기 때문에, 공압 서보는 고정도의 위치제어가 어려운 반면에, 변화외란에 기인하는 힘의 변동억제에 유리함으로 힘제어가 필요한 접촉작업에 응용하는 것이 적합하다.

본 논문에서는, 공압 로봇 매니플레이터의 힘 제어에 관해서 고찰하기로 한다. 대상물의 특성변화에 대하여 강인(robust)한 힘제어의 수법으로써는, 2자유도 힘제어계,^(4,5) 환경변동을 보상하는 외란 옵저버(disturbance observer)를 가진 힘제어계,^(6,7) 등이 제안되어 있으며, 접촉 및 충돌과정의 힘 제어로서 그 유효성이 확인되었다. 이들의 연구에서는 액추에이터의 속응성이 뛰어난 전기 모터를 사용하고 있기 때문에, 반작용력의 응답은 주로 대상물의 특성에 의존한다. 그러나, 공압 서보에 있어서의 힘제어계 응답은 대상물과 공압 액추에이터의 특성에 의존하기 때문에, 공압 액추에이터의 특성이 반작용력에 끼치는 영향을 고려하여 제어계를 설계할 필요가 있다.

저자들은 공압 매니플레이터의 위치제어계에 있어서, 제어 밸브의 제어입력과 각속도를 입력으로 하는 외란 옵저버를 가진 위치제어계^(8~10)를 구성하여, 외력, 마찰력 및 간섭력 등의 외란에 대해서 저감도한 위치응답을 얻을 수 있다는 것을 이론 및 실험을 통하여 확인한 바 있다. 본 논문에서는 이것을 공압 매니플레이터의 힘제어에 확장하기로 한다.⁽¹¹⁾ 공압 액추에이터의 토출량(discharge volume)을 알고 있다고 가정한다면, 압력센서의 정보를 이용함으로써 공압 액추에이터의 이론적인 발생토크(토출량×공압 액추에이터의 양 챔버의 압력차)를 계산으로 구할 수가 있다. 먼저, 공압 액추에이터의 비선형성 및 응답특성을 개선하기 위해서 압력센서의 정보를 이용하여 계산한 이론적인 발생토크를 피드백하여 내부 토크제어계(inner torque control system)를 구성한다. 다음으로, 외란에 대해서 저감도한 힘제어계를 구성하기 위해, 내부 토크제어계에 부가되는 목표토크와 반작용토크를 입력으로 하는 외란토크 옵저버(disturbance torque observer)를 구성하여 대상물의 특성변화 및 마찰

력 등의 외란을 하나의 외란으로서 총괄하여 추정한다. 이 옵저버에 의해 추정된 외란을 내부 토크 제어계의 목표토크에 피드백 보상하는 제어계를 구성하면, 외란의 영향에 대해서 저감도한 반작용토크의 응답을 얻을 수 있다. 본문에서는 공압 액추에이터를 모델링하고 반작용토크를 피드백하여 반작용토크제어계를 구성한다. 다음으로 내부 토크제어계 및 외란토크 옵저버를 구성하고 이들을 병용하는 강인 힘제어계를 구성한다. 그리고 각 제어계의 강인한 제어성능(robust performance) 및 안정성(robust stability)을 고찰한다. 공압 액추에이터, 매니플레이터 및 힘 센서를 포함한 대상물의 동가강성(equivalent stiffness)을 동정(identification)한 후, 각 제어계를 공압 액추에이터에 의해 구동되는 매니플레이터와 대상물이 접촉한 상태에서의 힘제어를 실행하는 시뮬레이션 및 실험을 통하여 제안한 강인 힘제어계의 유효성을 확인한다.

2. 공압 액추에이터의 모델링

2.1 기초식

Fig. 1은 Meter out 방식에 의해 구동되는 Vane type 공압 액추에이터의 구동회로를 간단히 나타낸 해석 모델이다. 매니플레이터를 화살표 방향으로 회전시키기 위해서는, 챔버 1에 일정한 압축공기 P_s 를 공급하고, 챔버 2 내부의 압축공기는 제어 밸브의 유효 단면적 s 를 변화시키는 것에 의해 대기압 P_A 에 배출된다. 이 과정에 의해 양 챔버 사이에는 차압이 생기고, 매니플레이터는 O 축을 중심으로 화살표 방향으로 회전하게 된다. 매니플레이터의 회전속도는 제어 밸브의 유효 단면적을 조

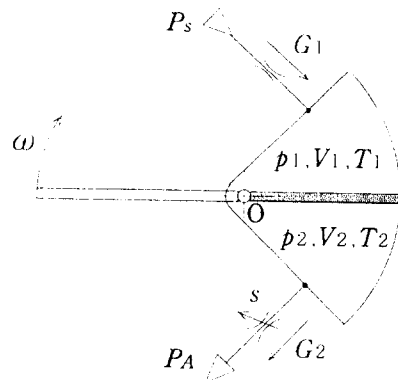


Fig. 1 Analysis model of pneumatic actuator

정하는 것에 의해 제어할 수 있다.

챔버내의 압력변화 식을 도출하기 위하여, 양 챔버내의 압축공기는 단열변화하고, 온도변화는 미소하다고 가정한다. 압축공기가 공급되는 챔버 측을 첨자 1로 표시하고 챔버내의 압축공기가 제어밸브의 개폐에 의해 대기압으로 배출되는 챔버 측을 첨자 2로 표시하기로 한다. 이러한 가정에 의한 챔버내의 압력변화 식은 다음처럼 표시된다.

$$\frac{dp_1}{dt} = \frac{\kappa RT_1}{V_1} G_1 - \frac{\kappa p_1 D}{V_1} \omega \quad (1)$$

$$\frac{dp_2}{dt} = -\frac{\kappa RT_2}{V_2} G_2 + \frac{\kappa p_2 D}{V_2} \omega \quad (2)$$

여기서, p 는 챔버내의 압력변화율, V 는 챔버의 체적을, T 는 챔버내의 온도를, D 는 Vane type 공압 액추에이터의 토출량을, G 는 공기의 질량유량을, R 은 공기의 기체상수를, κ 는 공기의 단열지수를 나타내며, ω 는 매니플레이터의 각속도를 나타낸다.

제어 밸브의 상류측 압력을 p_u , 하류측은 p_d 라고 하면, 제어 밸브를 통과하는 공기의 질량유량은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$* . 0 \leq \frac{p_d}{p_u} \leq 0.528 \text{의 경우}$$

$$G = s p_u \sqrt{\frac{2}{RT} \frac{\kappa}{\kappa+1} \left(\frac{2}{\kappa+1}\right)^{\frac{2}{\kappa-1}}} \quad (3)$$

$$* . 0 \leq \frac{p_d}{p_u} \leq 1 \text{의 경우}$$

$$G = s p_u \sqrt{\frac{2}{RT} \frac{\kappa}{\kappa-1} \left\{ \left(\frac{p_d}{p_u}\right)^{\frac{2}{\kappa}} - \left(\frac{p_d}{p_u}\right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa}} \right\}} \quad (4)$$

여기서, s 는 제어 밸브의 유효 단면적을 나타낸다.

2.2 선형화

공압 액추에이터의 챔버내의 압력변화를 나타내는 식 (1)과 식 (2)은 비선형성이 강한 압력변화식이기 때문에, 이 식들을 기초로 하여 제어계를 설계하는 것은 용이한 일이 아니다. 그래서 이 식들을 평형점 근방에서 선형화를 한다. 평형점과 그 근방에 있어서의 각 파라미터의 미소 변화량은 다음의 관계를 가진다고 한다.

$$\begin{cases} s = s_0 + \delta s, & V = V_0 + \delta V \\ p = p_0 + \delta p, & G = G_0 + \delta G \end{cases} \quad (5)$$

여기서, 첨자 0는 평형점에 있어서의 기준상태를

나타내고, δ 는 각 파라미터의 변화량을 나타낸다. 공급측의 제어 밸브의 유효단면적이 변화하지 않도록 구성된 Meter out 방식에 의해 구동되는 공압 서보에 있어서, 각 챔버에 출입하는 질량유량의 변화는 다음 식과 같다.

$$\delta G_1 = \frac{\partial G_1}{\partial s} \delta s + \frac{\partial G_1}{\partial p_1} \delta p_1 = k_p \delta p_1 \quad (6)$$

$$\delta G_2 = \frac{\partial G_2}{\partial s} \delta s + \frac{\partial G_2}{\partial p_2} \delta p_2 = -k_s \delta s + k_p \delta p_2 \quad (7)$$

여기서,

$$k_p = -\frac{\partial G_1}{\partial p_1} = \frac{\partial G_2}{\partial p_2}, \quad k_s = \frac{\partial G_2}{\partial s} \quad (8)$$

이고, k_p 는 압력변화에 대한 질량유량의 변화율, k_s 는 제어 밸브의 유효 단면적에 대한 질량유량의 변화율을 나타낸다.

식 (6)~(8)을 식 (1)과 식 (2)에 대입하여 변화량의 2차 이상의 항을 무시하고, 양 챔버의 차압 $p_L = (p_1 - p_2)$ 의 변화량에 대해서 정리하면, 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{d\delta p_L}{dt} = \frac{\kappa RT}{V_0} (-k_p \delta p_L + k_s \delta s) - \frac{2\kappa p_0 D}{V_0} \omega \quad (9)$$

본 논문에서는 챔버내의 압축공기를 대기로 배출하기 위해서, PCM(pulse code modulation) 밸브를 채용한다. PCM 밸브의 구성시에, ON-OFF 전자 밸브의 개구 면적비를 $S_1 : S_2 : \dots : S_n = 2^0 : 2^1 : \dots : 2^{n-1}$ 처럼 조절할 수 있다고 가정한다면, 제어입력 u 와 PCM 밸브의 유효 단면적 s 는 다음과 같은 선형 모델로 표현된다.

$$\delta s = k_u \delta u \quad (10)$$

k_u 는 정수인 제어입력을 PCM 밸브의 유효단면적으로 환산하는 비례계수이다.

따라서 선형화된 압력변화 식, 액추에이터의 발생토크 및 매니플레이터의 운동방정식은 다음 식으로 간단하게 표현할 수 있다.

$$T_a \frac{d\delta p_L}{dt} + \delta p_L = K_a (\delta u - k_v \delta \omega) \quad (11)$$

$$\delta T = D \delta p_L \quad (12)$$

$$J \frac{d\delta \omega}{dt} + b \delta \omega = \delta T - \delta T_f - \delta T_L \quad (13)$$

여기서,

$$K_a = \frac{k_u k_s}{k_p}, \quad T_a = \frac{V_0}{\kappa k_p R T}, \quad K_v = \frac{2 p_0 D}{k_u k_s R T} \quad (14)$$

이고, T_a 는 전기 서보에 있어서 전기적 시정수와 같은 역할을 하므로 공기적 시정수라고 불려도 무방한 계수이다. K_a 는 PCM 밸브의 제어입력을 압력차원으로 환산하는 단위 환산계수이고, K_v 는 각 속도가 압력에 미치는 영향을 제어입력의 차원으로 단위를 환산하는 것이며, 전기 모터의 역기전력 정수와 같은 역할을 한다. J 는 관성모멘트, b 는 점성마찰계수, T 는 액추에이터의 발생토크, T_f 는 정지마찰력과 동마찰력을 포함하는 마찰토크, T_L 은 반작용토크이다.

3. 제어계의 구성

Fig. 2는 Meter out 방식을 이용한 공압 구동회로와 대상물의 등가모델을 나타낸다. Vane type 공압 액추에이터의 한쪽 챔버에 일정압력 P_s 를 공급하고, 다른 쪽의 챔버의 압축공기는 제어밸브의 개구면적 변화에 상당하는 질량유량을 대기로 배출하게 된다. 이로 인하여 양 챔버에 차압 P_L 이 생기고, 매니플레이터는 회전하게 된다. 식 (11) ~ (13)을 라플라스변환(Laplace transform)하면, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$(T_a s + 1) P_L(s) = K_a u(s) - K_v K_e \omega(s) \quad (15)$$

$$T(s) = D P_L(s) \quad (16)$$

$$(J s + b) \omega(s) = T(s) - T_f(s) - T_L(s) \quad (17)$$

대상물은 등가강성 K_e 로 모델화가 가능하다고 가정하면, 반작용토크 $T_L(s)$ 와 회전각 변위 $\theta_e(s)$ 의 관계는 다음 식으로 표시된다.

$$T_L(s) = K_e \theta_e(s) \quad (18)$$

이후부터 라플라스변환을 나타내는 각 변수의 (s) 는 생략하기로 한다.

3.1 일반적인 토크제어계

외란 읍저버를 가진 강인 토크제어계와 성능을 비교하기 위하여, 반작용토크를 피드백하여 Fig. 3과 같은 토크제어계를 구성한다. 이를 본 논문에서는 일반적인 토크제어계로 명명한다. ω 로부터 제어입력 u 에, 그리고 반작용토크로부터 $T - T_f$ 에 피드백하는 루프는 자연현상을 모델링한 것이다. PCM 밸브를 구동하기 위한 제어입력은 다음과 같이 계산한다.

$$u = C(T_{cr} - T_L) \quad (19)$$

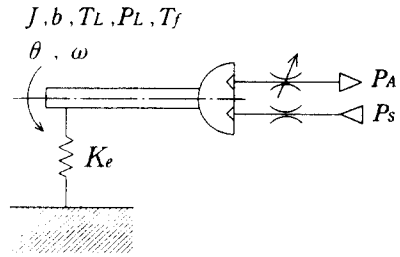
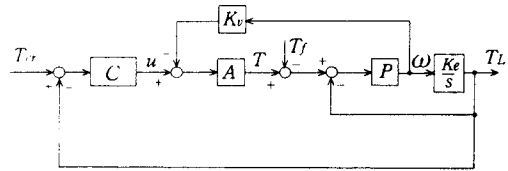
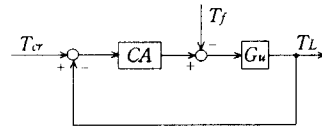


Fig. 2 Pneumatic drive circuit and equivalent model of object



(a) Reaction torque control system



(b) Equivalent system of (a)

Fig. 3 Block diagram of usual reaction torque control system

여기서, T_{cr} 은 토크제어계에 부가되는 목표토크이고, C 는 토크컨트롤러이다. 반작용토크는 다음과 같이 주어진다.

$$T_L = \frac{G_u(AC T_{cr} - T_f)}{1 + G_u AC} \quad (20)$$

여기서,

$$\begin{cases} A = \frac{K_a D}{T_a s + 1}, P = \frac{1}{J s + b} \\ G_u = \frac{P K_e}{(1 + A P K_v) s + P K_e} \end{cases} \quad (21)$$

이고, A 는 공압 액추에이터의 모델, P 는 매니플레이터의 구동을 나타내는 플랜트의 모델, G_u 는 플랜트모델, 대상물의 특성 및 K_v 의 영향을 포함한 전달함수이다. 목표치 추종특성 및 외란 억압특성은 토크컨트롤러 C 에 의해서 조절할 수 있으며, 이를 동시에 만족하도록 컨트롤러의 파라미터를 결정할 수 없기에 이들간의 trade off를 고려하여 토크컨트롤러의 파라미터를 결정할 필요가 있다.

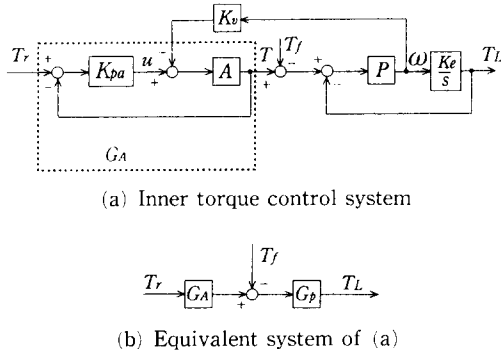


Fig. 4 Pneumatic drive system to improve dynamic characteristics of actuator

3.2 내부 토크제어계

Rotary type 공압 액추에이터의 토출량 D 를 기지상수(known constant)라고 한다면, 이론적인 발생토크 T 는 식 (12)에서 나타낸 것과 같이 압력신호를 사용함으로써 계산할 수 있다. 저자들은 이것에 주목하여 Meter out 방식에 의해 구동되는 공압 액추에이터의 응답특성을 개선하기 위해, Fig. 4와 같이 이론적인 발생토크를 피드백하여 비례제어계 $u = K_{pa}(T_r - T)$ 를 구성한다. 이것을 본 논문에서는 내부 토크제어계라고 부르고 있다. 내부 토크제어계에 의해 개선된 공압 액추에이터의 발생토크의 상태방정식은 다음 식으로 나타내어진다.

$$\begin{cases} (T_{AS} + 1)T = K_m T_r - \frac{K_m K_v}{K_{pa}} \omega \\ T_A = \frac{T_e}{1 + K_a D K_{pa}}, K_m = \frac{K_a D K_{pa}}{1 + K_a D K_{pa}} \end{cases} \quad (22)$$

여기서, K_{pa} 는 내부 토크제어계의 비례이득, T_r 은 내부 토크제어계의 목표토크이다. K_{pa} 를 크게 설정하면 할수록 공압 액추에이터의 특성은 $K_m = 1$ 으로 되며, T_A 가 작은 선형 1차 지연시스템으로 개선된다. 이하에서는 제어계를 간단하게 표현하기 위해, 다음 식으로 정의한 전달함수를 사용하여 Fig. 4(a)를 Fig. 4(b)처럼 등가변환한다.

$$\begin{cases} G_A = \frac{K_m}{T_{AS} + 1} \\ G_P = \frac{PK_e}{(1 + \frac{G_A PK_v}{K_{pa}})s + PK_e} \end{cases} \quad (23)$$

3.3 외란 옵저버의 구성

내부 토크제어계에 의해 변형된 공압 액추에이터

의 전달함수 G_A , 매니플레이터의 전달함수 P 및 대상물의 등가강성 K_e 의 각 파라미터에 관한 공칭값(nominal value)과 그 변동량의 관계는 다음과 같다.

$$\begin{cases} K_m = K_{mn} + \Delta K_m, T_A = T_{An} + \Delta T_A \\ J = J_n + \Delta J, b = b_n + \Delta b \\ K_e = K_{en} + \Delta K_e \end{cases} \quad (24)$$

여기서, 첨자 n 은 각 파라미터의 공칭값, Δ 은 각 파라미터의 변화량을 나타낸다. 식 (24)의 관계를 식 (17)과 식 (22)에 대입하여 T_L 에 대해서 정리하면, 다음과 같다.

$$\begin{cases} T_L = G_{An} G_{pn} (T_r - T_{dis}) \\ G_{An} = \frac{K_{mn}}{T_{An} s + 1}, G_{pn} = \frac{K_{en}}{J_n s^2 + b_n s + K_{en}} \end{cases} \quad (25)$$

여기서, G_{An} 과 G_{pn} 은 G_A 와 G_P 의 공칭모델(nominal model)을 나타낸다. T_{dis} 는 다음 식으로 정의되는 미지의 외란토크이다.

$$T_{dis} = \begin{cases} \frac{1}{G_{An}} \left\{ T_r (\Delta J s + \Delta b - \frac{\Delta K_e}{K_{en} P_n}) \omega \right\} \\ - \frac{1}{K_{mn}} \left(\frac{K_m K_v}{K_{pa}} \omega + \Delta T_{AS} T - \Delta K_m T_r \right) \end{cases} \quad (26)$$

식 (25)에 있어서, 내부 토크제어계의 목표토크 T_r 과 반작용토크 T_L 은 기지이고 미지수는 T_{dis} 뿐이다. 이를 추정하는 외란토크 옵저버(disturbance torque observer)는 다음과 같이 표현된다.

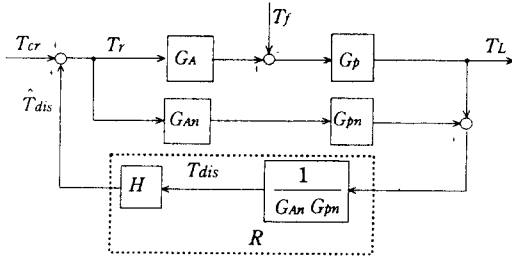
$$T_{dis} = \frac{G_{An} G_{pn} T_r - T_L}{G_{An} G_{pn}} \quad (27)$$

반작용토크 T_L 로 부터의 신호가 improper이기 때문에 적어도 $G_{An} G_{pn}$ 와 동일차수 이상의 저주파수 통과필터(low pass filter) H 를 삽입해야 할 필요가 있으며, 외란토크 T_{dis} 는 다음 식의 \hat{T}_{dis} 로서 추정된다.

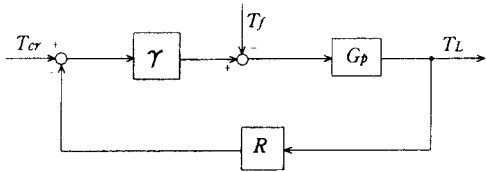
$$\hat{T}_{dis} = R(G_{An} G_{pn} T_r - T_L) \quad (28)$$

R 은 $H(G_{An} G_{pn})^{-1}$ 으로 설정되는 보상기(compensator)이다.

Fig. 5는 외란토크 옵저버에 의해 추정되는 외란토크(Estimated disturbance torque) \hat{T}_{dis} 를 내부 토크제어계의 목표토크에 피드백 보상하여 구성한 강인 토크제어계이다. T_{cr} 은 토크제어계에 부가되는 실제 목표토크를 나타낸다. 제어계를 간단히 표현하기 위해서, Fig. 5(a)를 다음 식에서 정의한



(a) Disturbance torque observer



(b) Equivalent system of (a)

Fig. 5 Robust torque control system using disturbance torque observer

함수를 가지고 Fig. 5(b)와 같이 등가변환한다.

$$\gamma = \frac{G_A}{1 - R G_{An} G_{pn}} \quad (29)$$

따라서, 반작용토크는 다음 식으로 주어진다.

$$T_L = \frac{1}{\frac{1}{\gamma G_p} + R} T_{cr} - \frac{-1}{\frac{1}{\gamma G_p} + R} T_f \quad (30)$$

$1 - R G_{An} G_{pn} = 0$ 를 만족하는 주파수 영역에서는, $\gamma = \infty$ 로 되기 때문에, $T_L = R^{-1} T_{cr}$ 로 되고, 반작용토크의 응답은 보상기의 특성에 고정된다. 따라서, 내부 토크제어계와 외란토크 읍저버를 병용한 강인 토크제어계는 마찰토크 및 대상물의 강성변화 등의 외란에 대하여 저감도한 반작용토크의 응답을 얻을 수 있다.

4. 강인 제어성능과 안정성

일반적인 토크제어계와 외란읍저버를 가진 강인 토크제어계에 있어서, 대상물의 강성변화 ΔK_e 에 대한 반작용토크의 응답특성을 나타내는 강인 제어 성능(robust performance)과 피드백 제어계의 안정성(robust stability)을 고찰한다. 해석을 간단하게 하기 위해서, $T_f = 0$, $A = A_n$, $G_A = G_{An}$, $P = P_n$, $K_v = K_{vn}$ 으로 가정한다.

4.1 일반적인 토크제어계

대상물의 강성변화에 대하여 식 (21)에서 정의한 전달함수 G_u 는 다음과 같이 공칭모델 G_{un} 와 변동모델 ΔG_u 으로 분리할 수 있다고 한다.

$$\begin{aligned} \Delta G_u &= G_u - G_{un} \\ &= \frac{G_{un} \Delta K_e (1 + A P K_v) s}{\{(1 + A P K_v) s + P K_e\} K_{en}} \end{aligned} \quad (31)$$

이 관계식을 이용하여 Fig. 3의 제어계를 등가변환하면, Fig. 6과 같이 표현된다. 변동모델 ΔG_u 에 대하여 토크제어계가 안정하기 위한 충분조건은 small gain 정리에 의해 다음 식으로 주어진다.

$$\left\| \frac{C(j\omega) A(j\omega)}{1 + C(j\omega) A(j\omega) G_{un}(j\omega)} \Delta G_u(j\omega) \right\|_{\infty} < 1 \quad (32)$$

단, $\frac{CA}{1 + CAG_{un}}$ 는 충분히 안정하다고 가정한다. 또, ΔG_u 는 다음과 같이 안정한 기지함수(known function) r_u 에 제약을 받는다고 가정한다.

$$|\Delta G_u(j\omega)| < |r_u(j\omega)|^{\forall \omega} \quad (33)$$

따라서, 일반적인 토크제어계가 ΔG_u 에 대하여 안정하기 위해서는 다음 식을 만족하도록 토크컨트롤러를 조정하면 된다. ^(12,13)

$$\left\| \frac{C(j\omega) A(j\omega)}{1 + C(j\omega) A(j\omega) G_{un}(j\omega)} \Delta G_u(j\omega) \right\|_{\infty} < 1 \quad (34)$$

대상물의 강성변화에 대하여 피드백 제어계의 강인 안정성을 나타내는 상보감도함수(complementary sensitivity functions) T_u 와 외란에 대하여 저감도한 특성의 지표인 감도함수(sensitivity functions)

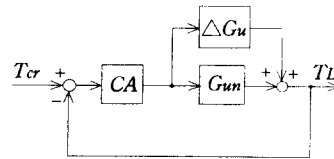


Fig. 6 Equivalent system of usual reaction torque control system

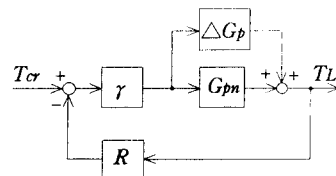


Fig. 7 Equivalent system of robust torque control system

S_u 는 다음 식의 관계로 주어진다.

$$T_u = \frac{CAG_{un}}{1 + CAG_{un}}, S_u = 1 - T_u \quad (35)$$

$T_u \rightarrow 1$ 로 되는 주파수 영역에서는, $S_u \rightarrow 0$ 으로 되기 때문에 제어계는 대상물의 강성변화에 대하여서는 저감도한 반작용토크의 특성을 나타내나, 강인 안정성은 저하하므로 양자의 trade off를 고려하여 토크컨트롤러를 설계해야 한다.

4.2 강인 토크제어계

내부 토크제어계와 외란토크 옵저버를 병용한 강인 토크제어계에 있어서, 대상물의 강성변화에 기인하는 변동모델 ΔG_p 는 다음 식으로 정의한다.

$$\Delta G_p = G_p - G_{pn} = \frac{G_{pn} \Delta K_e (1 + \frac{G_A PK_v}{K_{pa}}) s}{((1 + \frac{G_A PK_e}{K_{pa}}) s + PK_e) K_{en}} \quad (36)$$

여기서, G_{pn} 은 G_p 의 공칭모델이다.

ΔG_p 에 대하여 강인 토크제어계가 안정하기 위한 충분조건은 다음 식으로 주어진다.

$$\left\| \frac{\gamma(j\omega) R(j\omega)}{1 + \gamma(j\omega) R(j\omega) G_{pn}(j\omega)} \Delta G_p(j\omega) \right\|_{\infty} < 1 \quad (37)$$

단, $\frac{\gamma R}{1 + \gamma R G_{pn}}$ 은 충분히 안정하다고 가정한다. 또, ΔG_p 는 다음 식과 같이 기지함수 r_p 에 의해 제한되고 있다고 가정한다.

$$|\Delta G_p(j\omega)| < |r_p(j\omega)| \quad \forall \omega \quad (38)$$

따라서, 변동모델 ΔG_p 에 대하여 안정한 토크제어계를 구성하기 위해서는, 다음의 부등식을 만족하도록 식 (28)에서 정의한 보상기 내의 저주파수 통과필터를 설계해야 한다.

$$\left\| \frac{\gamma(j\omega) R(j\omega)}{1 + \gamma(j\omega) R(j\omega) G_{pn}(j\omega)} r_p(j\omega) \right\|_{\infty} < 1 \quad (39)$$

강인 토크제어계에 있어서, 상보감도함수 T_{ob} 와 감도함수 S_{ob} 는 다음의 관계식으로 표현된다.

$$T_{ob} = \frac{\gamma R G_{pn}}{1 + \gamma R G_{pn}}, S_{ob} = 1 - T_{ob} \quad (40)$$

$1 - R G_{An} G_{pn} \rightarrow 0$ 을 만족하는 주파수영역에서는, $\gamma \rightarrow \infty$ 로 되고, $T_{ob} \rightarrow 1$, $S_{ob} \rightarrow 0$ 로 되기 때문에, 강인 토크제어계는 대상물의 강성변화에 대하여서는 저감도한 반작용토크의 응답을 얻을 수 있으나,

안정성은 저하한다. 강인 토크제어계에 있어서, 외란의 영향을 억압하기 위해서는 식 (39)을 만족하도록 식 (28)의 저주파수 통과필터를 설계하고, 반작용토크의 속응성은 식 (25)에서 나타낸 것 같이 내부 토크제어계 ($G_A = G_{An}$)에 의해 조절할 수 있는 이점을 가지고 있다.

5. 결과 및 고찰

5.1 공압 매니퓰레이터

Fig. 8은 Meter out 방식에 의해 구동되는 공압 매니퓰레이터의 제어회로를 나타낸다. 계산기로부터의 출력신호인 제어밸브의 입력 u 는 Vane type 공압모터 내의 압축공기를 대기로 배출하기 위하여 구성한 PCM 밸브 및 공압 매니퓰레이터의 회전방향을 제어하기 위한 3 port 전자밸브를 동시에 구동한다. PCM 밸브는 ON-OFF 밸브의 개구 면적비가 $S_1 : S_2 : S_3 : \dots : S_n = 2^0 : 2^1 : \dots : 2^3 : \dots : 2^{n-1}$ 를 유지하도록 유효 단면적을 조절하여 병렬 접속한다. 즉, ON-OFF 밸브의 배출유량을 측정하여 각 밸브의 유효 단면적비가 다음 식의 관계를 유지하도록 조임쇠를 사용하여 배기부의 유효 단면적을 조절한다.

$$S_1 : S_2 : S_3 : S_4 \dots = \frac{1.2}{32} : \frac{1.2}{16} : \frac{1.2}{8} : \frac{1.2}{4} \dots \quad (41)$$

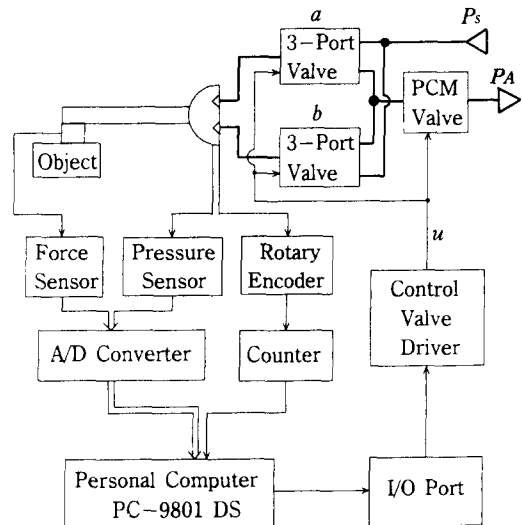


Fig. 8 Control circuit of pneumatic manipulator

이것은 유효 단면적이 1.2 mm^2 인 ON-OFF 밸브를 사용하여 PCM 밸브를 구성한 경우의 예를 나타낸 것이다. 본 논문에서는 6개의 ON-OFF 밸브를 병렬접속하여 PCM 밸브를 구성하였기 때문에, 2°단계로 배기유량을 조절할 수 있으며, Meter out 방식에 의해 2°단계의 속도조절이 가능하다. 대상물에 접촉력을 가하기 위해서는, b 의 3 port 전자밸브를 ON으로 하고 일정압력 P_s 를 한 쪽의 챔버에 공급함과 동시에, a 의 3 port 전자밸브를 OFF으로 하여, 다른 쪽 챔버와 PCM 밸브를 연결시켜 챔버내의 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.

공압 매니플레이터의 회전각도를 피드백하여 위치제어계를 구성할 수 있도록 분해능(resolution)이 $1.56 \times 10^{-4} \text{ rad}$ 인 로터리엔코더를 회전축에 고정했다. 공압 액추에이터의 양 챔버에는 분해능이 0.234 kPa인 압력센서를 장착하여 공압 액추에이터내의 압력변화를 검출한다. 또, 분해능이 0.03 N인 힘센서를 매니플레이터(0.15 m)의 말단부에 부착시켜서 반작용토크를 검출한다. 대상물로서는 스폰지와 고무를 고정된 벽에 부착시킨다. 공급압력은 $P_s=490 \text{ kPa}$ 이고 제어서의 샘플링주기는 7.7 ms이다.

5.2 파라미터의 동정

시스템의 특성과악 및 시뮬레이션을 행하기 위해서는 시스템의 각 파라미터를 동정(identification)할 필요가 있다. 각 파라미터를 동정하기에 앞서 Meter out 방식에 의해 구동되는 공압 액추에이터의 특성을 살펴보자.

Fig. 9는 공압 액추에이터의 말단부를 대상물(고무)에 접촉시킨 상태에서, Fig. 3의 제어계에서 반작용토크를 피드백하지 않고 제어입력 $u=10, 20, 40, 60$ 을 부가하였을 때 발생하는 공압 액추에이터의 발생토크의 응답을 나타낸다. 어떠한 제어입력을 부가할지라도 발생토크는 공급압력에 기인하는 토크에 수렴한다. 공급압력이 490 kPa 일 경우에, 공압 액추에이터의 최대 발생토크는 약 17.5 Nm인 것을 확인할 수 있다. 발생토크는 각각의 제어입력에 대하여 속응성이 다른 응답을 보이고 있으며, 상당히 낮은 응답성을 나타내고 있다.

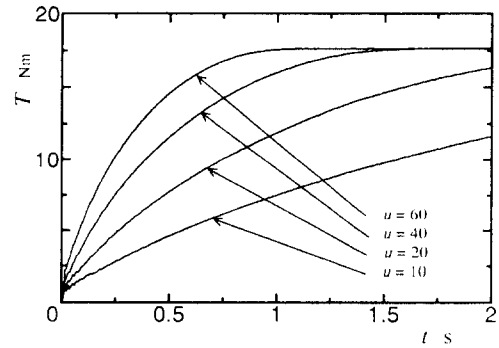
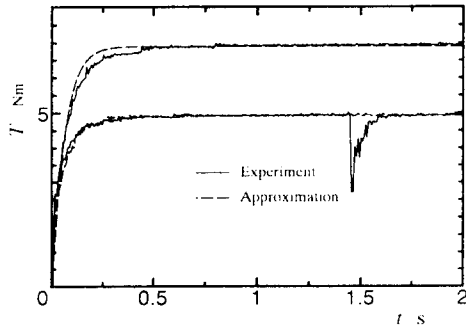


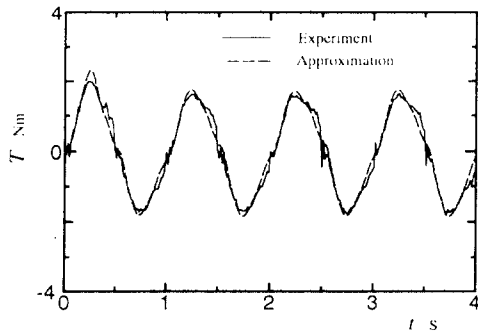
Fig. 9 Response of the generated torque in usual reaction torque control system ($u=10, 20, 40, 60$)

이와 같이 Meter out 방식에 의해 구동되는 공압 액추에이터의 특성을 개선하기 위하여, Fig. 4와 같이 이론적인 발생토크를 피드백하여 내부 토크제어계를 구성하였다. 각 파라미터는 Fig. 4의 제어계와 식 (22)에 목표토크 $T_r=5, 7 \text{ Nm}$ 의 계단 입력 및 $T_r=3 \sin(2\pi t) \text{ Nm}$ 의 정현파입력을 인가하여 발생토크, 각속도 및 반작용토크의 응답을 고려하여서 파라미터를 동정한다. 공압 액추에이터의 파라미터를 동정하기 위해서 내부 토크제어계의 비례이득은 $K_{pa}=151/\text{Nm}$ 로 설정했다. Fig. 10에 있어서의 실선은 공압 액추에이터의 발생토크의 응답을, 점선은 동정모델의 응답을 나타낸다. (a)는 매니플레이터를 대상물에 고정된 상태($\omega=0$)에서의 응답이며, 실험치에 근접하도록 동정모델의 파라미터 K_m, T_A 를 조정하여 양 응답의 차가 가장 적을 때의 파라미터를 선택하였다. $T_r=5 \text{ Nm}$ 의 경우, 1.5초 근방에서 발생토크가 급격히 감소되는 것은 Meter out 구동방식을 선택한 구동계 고유의 특징에 의한 것이다. 이 현상은 T_r-T 의 부호가 바뀌면서 3 port 밸브가 절환(switching)됨으로 생기는 것이다. 이 현상을 제외하면, 목표토크 T_r 에서 공압 액추에이터의 발생토크 T 까지는 1차 지연 시스템에 가까운 응답특성을 나타내며, 속응성 또한 개선되었음을 확인할 수 있다.

(b)는 매니플레이터를 구속하지 않은 상태($\omega \neq 0$)에서 정현파 입력을 인가했을 때의 응답을 나타내며, 양 응답의 차가 작게 되도록 식 (22)의 동정모델의 파라미터 K_v 를 조정한다. 실험치와 모델의 응답이 잘 일치하고 있으므로 결정된 파라미터의 신빙성을 확인할 수 있다.



(a) In the case of $\omega=0$ ($T_r=5, 7\text{Nm}$)



(b) In the case of $\omega \neq 0$ ($T_r=3\sin(2\pi t)\text{Nm}$)

Fig. 10 Response of the generated torque in control system with inner torque control system

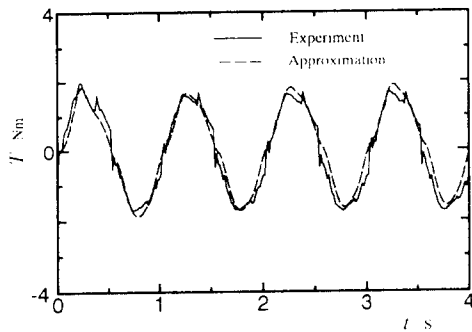
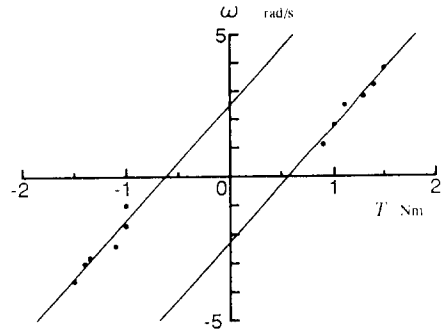
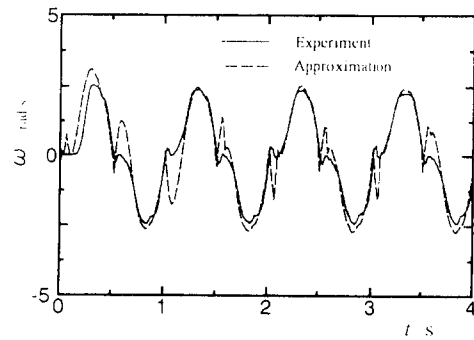


Fig. 11 Response of the generated torque in usual reaction torque control system ($u=20\sin(2\pi t)$ [Nm])

Fig. 11은 동정한 각 파라미터의 유효성을 확인하기 위해서 Fig. 3의 제어계와 식 (15)의 제어입력에 $u=20\sin(2\pi t)$ 의 정현파 입력을 부가했을 경우의 실측치 및 동정모델의 응답을 나타낸다. T_a , K_a 는 식 (22)을 역산하여 구한 값을 사용했다. 양 응답이 잘 일치하고 있는 것으로 보아 동정한 공압



(a) Relation with generated torque and angular velocity



(b) Response of angular velocity

Fig. 12 Identification of b, J and T_r

액추에이터의 파라미터값은 실제값에 가깝다고 생각할 수 있다.

Fig. 12는 점성마찰계수, 관성모멘트 및 마찰토크를 동정하기 위한 발생토크와 각속도의 관계 및 각속도의 응답을 나타낸다. 점성마찰계수는 Fig. 12(a)의 기울기로서 정할 수 있으며, 마찰토크 T_r 는 각속도가 $|\omega|=1\text{rad/s}$ 이하의 마찰력은 Coulomb마찰력과 동일하다고 가정하여 결정했다. 관성모멘트는 Fig. 4의 제어계의 목표토크에 $T_r=3\sin(2\pi t)\text{Nm}$ 의 정현파 입력을 인가하였을 때의 각속도와 그 때의 발생토크를 식 (17)에 부가하였을 때에 생기는 동정모델의 응답차가 작도록 파라미터를 조정하여 결정했다. 각속도의 절대값이 작은 부근에서는 양 응답차가 크다. 이것은 정지마찰토크와 Coulomb 마찰토크의 크기를 같이하여 마찰토크를 결정하였기 때문이다. 그러나, 그 외에는 양 응답이 잘 일치하고 있다.

Fig. 13은 공압 매니퓰레이터의 말단부를 대상으로 접촉시킨 상태에서 회전각 θ 와 반작용토크 T_L

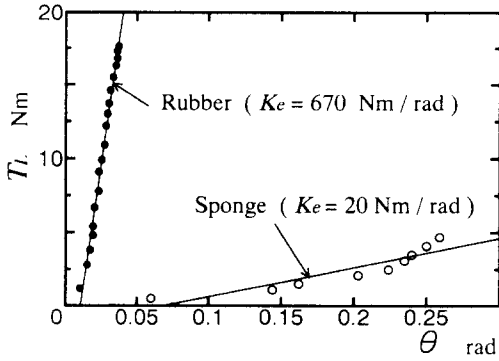


Fig. 13 Equivalent stiffness of object

Table 1 Identification parameters of control system

D	m ³	3.5 × 10 ⁻⁵
K _{pa}	1/Nm	15
K _m		0.98
T _A	s	0.067
K _v	s/rad	10
K _a	kPa	131.15
T _a	s	4.76
J	Nm·s ² /rad	0.02
b	Nm·s/rad	0.25
T _r	Nm	0.9
K _e (Sponge)	Nm/rad	20
K _e (Rubber)	Nm/rad	670

의 관계를 측정 한 것이다. 이 관계로부터 힘센서를 포함한 대상물의 등가강성을 구한다.

이상의 방법에 의해 동정한 각 파라미터를 Table 1에 나타낸다. 이것들은 시뮬레이션에 사용한다. Table 2는 외란토크 읍저버를 구성하기 위한 공칭모델의 파라미터와 일반적인 반작용토크 제어기의 컨트롤러의 이득값을 나타낸다. 토크컨트롤러는 $C = (K_p + \frac{K_I}{s})$ 으로 설정했다.

5.3 시뮬레이션에 의한 고찰

5.3.1 내부 토크제어계의 유효성

식(17), 식 (18) 및 식 (22)을 기초로하여 구성

Table 2 Parameters of nominal model and gains of controller

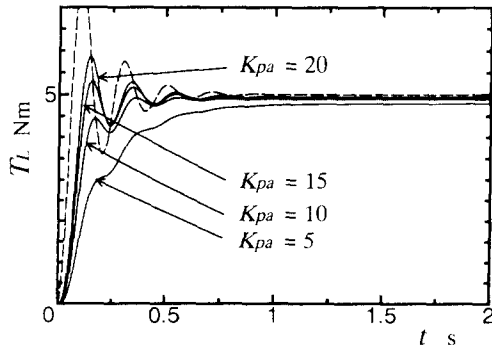
K _{pa}	1/Nm	5, 15
K _{mn}		1
T _{An}	s	0.2, 0.067
J _n	Nm·s ² /rad	0.02
b _n	Nm·s/rad	0.25
T _{fn}	Nm	0.9
K _{en}	Nm/rad	20
K _p	1/Nm	10
K _I	1/Nm·s	2
T _h	s	0.067
T _q	s	0.02

되는 Fig. 4의 제어계에 있어서, T_r으로부터 T_L까지의 전달함수는 다음 식으로 주어진다.

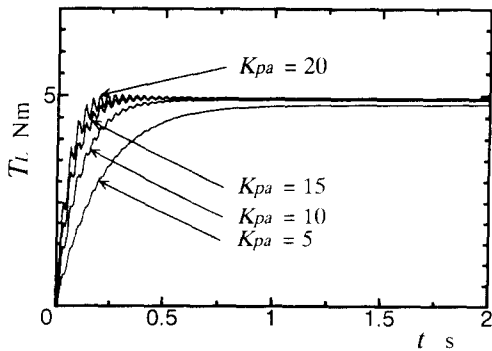
$$\frac{T_L}{T_r} = \begin{cases} \frac{K_m g_A \omega_n^2}{(s + g_A)(s^2 + s\zeta\omega_n s + \omega_n^2)} \\ g_A = \frac{1}{T_A}, \zeta = \frac{b}{2\omega_n J}, \omega_n = \sqrt{\frac{K_e}{J}} \end{cases} \quad (42)$$

식 (22)의 우변 제2항 ω의 영향은 $\omega = \frac{s}{K_e} T_L$ 와 같이 대상물의 등가강성 K_e에 의존하기 때문에, 대상물의 강성변화에 의한 외란으로 보고 본 논문에서는 무시하기로 한다. $g_A \gg \zeta\omega_n$ 이라면, 반작용토크는 부하부의 극에 대표되는 응답을 얻는다. 그러나, 공압 액추에이터는 공기의 압축성에 의해 g_A에 한계가 있으므로 공압 액추에이터의 특성은 반작용토크에 영향을 준다.

Fig. 14는 식(42)에 T_r=5 Nm의 목표토크를 부가하고 Table 1의 파라미터를 가지고 계산한 반작용토크의 응답이다. 점선은 Fig. 4에 있어서 T = T_r로 가정한 경우, 실선은 K_{pa}=5, 10, 15, 201/Nm으로 변화시킨 경우의 응답을 나타낸다. 각각의 K_{pa}에 대해서, 내부 토크제어계에 의해 변형된 공압 액추에이터의 극 -g_A는 -5.05, -9.85, -14.67, -19.5이고, 대상물을 포함한 부하부의 극은 대상물이 스펀지인 경우에는 -6.25 ± j30.98이고, 고무의 경우는 -6.25 ± j182.95이다. 공압 액추에이터의 응답지연이 반작용토크에 미치는 영향을 감소시키기 위해서는 $g_A \gg \zeta\omega_n$ 가 되도록 내부 토크제어계



(a) Sponge



(b) Rubber

Fig. 14 Effect of inner torque control system

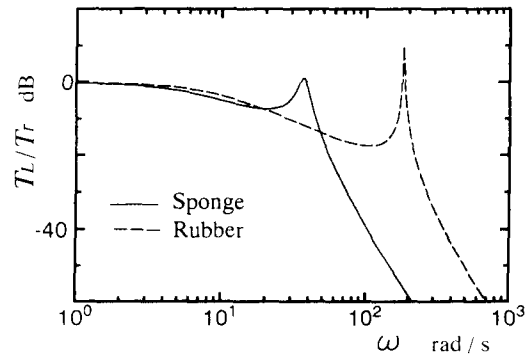
의 비례이득 K_{pa} 를 크게 설정하면 된다. 역으로, 어느 정도의 응답 지연이 허용될 경우에는 $g_A < \zeta\omega_n$ 을 만족하도록 K_{pa} 를 조절하는 것에 의해 공압 액추에이터의 응답 지연이 제어계의 특성을 지배하게 되고 대상물의 강성변화에 대하여 저감도한 반작용토크의 응답을 얻는다.

5.3.2 외란토크 옵저버의 효과

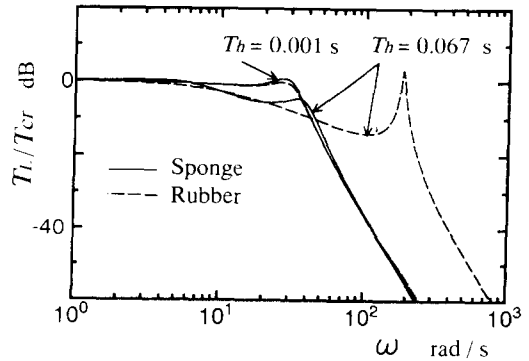
Fig. 15는 대상물의 강성변화가 반작용토크의 응답에 미치는 영향을 조사하기 위해 계산한 주파수 특성을 나타낸다. (a)는 Fig. 3의 제어계에 PI제어기를 구성하고, $K_p=101/\text{Nm}$, $K_I=21/\text{Nm}\cdot\text{s}$ 로 설정했을 경우의 특성이다. 대상물의 강성변화에 의한 이득특성은 큰 차이를 보이고 있다. (b)는 Fig. 5의 강인 토크제어계의 있어서 계산한 주파수 특성이며, 보상기는 다음과 같이 설정했다.

$$R = \frac{(T_{An}s+1)(J_n s^2 + b_n s + K_{en})}{(T_h s + 1)^3 K_{mn} K_{en}} \quad (43)$$

여기서, K_{en} 은 스펀지의 등가강성 공칭값으로 설



(a) PI control



(b) Robust control

Fig. 15 Effect of disturbance torque observer

정했다. 저주파수 통과필터의 시정수 $T_h=0.067\text{ s}$ 는 실험에 있어서 힘센서의 노이즈영향이 크게 나타나지 않는 범위에서 설정한 최소 시정수의 값을 나타낸다. 또, 대상물이 고무인 경우, ΔK_e 에 기인하는 변동 ΔG_p 에 대하여 식 (37)을 만족하고 있다는 것을 확인하고 있다. $T_h=0.001\text{ s}$ 는 강인 토크제어계의 특성을 파악하기 위해서 설정한 값이며, 대상물의 강성이 33.5배로 변화하였음에도 불구하고 양 주파수 특성은 거의 일치하고 있다. 이것으로 보아 강인 토크제어계는 대상물의 강성이 변화하더라도 필터의 시정수를 최대한 작게 설정함으로써 반작용토크의 응답이 크게 변화하지 않는다는 것을 알 수 있다. 그러나, 제어계의 안정성이 악화되므로 시정수의 크기에는 한계가 있다.

5.4 실험에 의한 고찰

5.4.1 외란토크 옵저버의 성능

Fig. 5의 제어계에 있어서, $T_{cr}=5\text{ Nm}$, $T_h=0.$

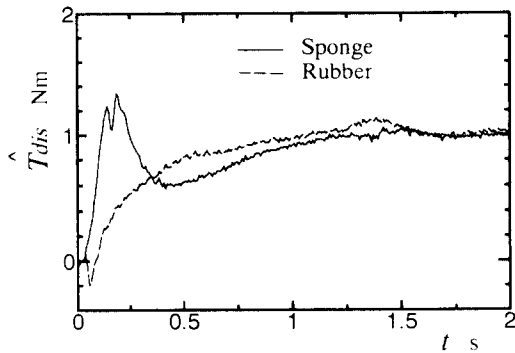
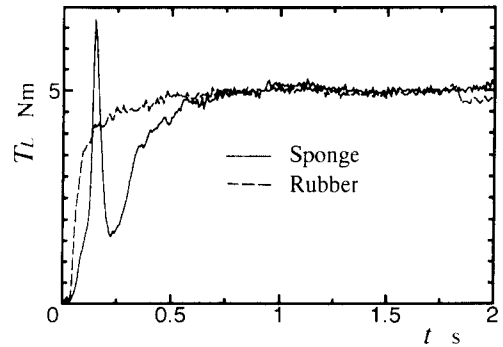


Fig. 16 Estimated disturbance torque

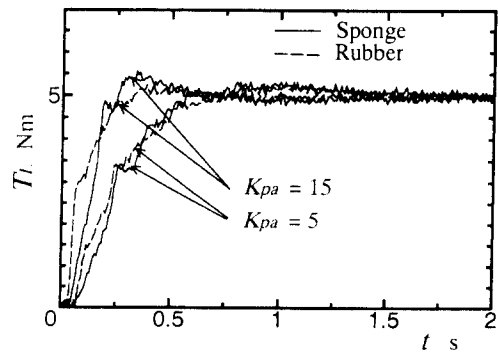
067s, $K_{pa}=151/\text{Nm}$ 으로 설정했을 때, \hat{T}_{dis} 의 응답을 Fig. 16에 나타낸다. 보상기는 식 (43), K_{en} 은 스펀지의 등가강성을 사용했다. 대상물이 스펀지인 경우, \hat{T}_{dis} 가 상승시에 나타나는 피크는 정지 마찰토크에 상당하는 것으로 생각되며, 일정치에 수렴한 후에는 Coulomb 마찰토크를 나타낸다. 고무의 경우에는 강성변화 ΔK_e 의 영향이 추가된다. 식 (26)에 의하면, 대상물의 강성변화는 추정 외란토크를 감소시키기 때문에 피크가 나타나지 않는다고 생각할 수가 있다. $\omega=0$ 가 되면, 대상물의 강성변화에 관계없이 외란토크 읍저버는 Coulomb 마찰토크를 추정한다.

5.4.2 반작용토크의 특성

Fig. 17은 대상물에 매니플레이터를 접촉시킨 상태에서 일반적인 토크제어계와 강인 토크제어계에 의해 반작용토크를 제어한 결과이다. $T_{cr}=5 \text{ Nm}$ 으로 설정했다. (a)는 대상물이 고무인 경우에 양호한 응답을 얻을 수 있도록 $K_p=101/\text{Nm}\cdot\text{s}$, $K_I=21/\text{Nm}\cdot\text{s}$ 으로 설정한 PI 제어기에 의한 반작용토크의 응답이다. 대상물이 스펀지인 경우, 응답은 상당히 진동적인 결과를 얻었다. 진동을 억제하기 위해서는 제어기의 이득을 재조정할 필요가 있다. (b)는 Fig. 5의 강인 토크제어계에 있어서, $K_{pa}=5, 151/\text{Nm}$ 으로 설정했을 때의 응답이다. 강인 토크제어계는 Fig. 16의 추정 외란토크를 내부 토크제어계의 목표토크에 피드백하는 것에 의해 대상물의 강성변화 및 마찰토크 등의 외란에 대하여 저감도한 반작용토크의 응답특성을 얻고 있다. 또, 반작용토크의 속응성은 내부 토크제어계의 비례이득 값의 크기에 따라 조절가능하다. 따라서, 본 논문



(a) PI control



(b) Robust control

Fig. 17 Response of reaction torque

에서 구성한 강인 토크제어계는 외란 읍저버에 의해 추정된 외란을 피드백 보상함으로 외란에 대한 저감도한 반작용토크의 응답을 얻을 수 있고, 내부 토크제어계의 비례이득 값을 조절하는 것에 의해 반작용토크의 속응성을 각각 독립적으로 조절할 수 있는 이점을 가지고 있다는 것이 확인된다.

6. 결 론

본 논문에서는, Vane type 공압 액추에이터의 발생토크를 피드백하여 내부 토크제어계를 구성하고 그 목표토크와 반작용토크를 입력으로 하는 외란토크 읍저버를 구성했다. 이 읍저버는 마찰토크 및 대상물의 강성변화 등을 하나의 외란으로 총괄하여 추정하는 기능을 가지고 있으며, 추정외란토크를 내부 토크제어계의 목표토크에 피드백 보상하여 강인 토크제어계를 구성했다. 시뮬레이션 및 반작용토크를 제어하는 실험에 의해 다음의 결과를 얻었다.

(1) 내부 토크제어제에 의해 공압 액추에이터의 응답특성 및 반작용토크의 속응성을 조절할 수 있다.

(2) 외란토크 옵저버에 의해 추정되는 외란토크를 내부 토크제어계의 목표토크에 피드백 보상하는 것에 의해 마찰토크 및 대상물의 강성변화 등의 영향을 감소시킬 수 있다.

(3) 저주파수 통과필터의 시정수를 작게 설정하면, 마찰토크 및 대상물의 강성변화 등에 대해서 보다 저감도한 제어계를 구성할 수 있으나, 이것은 센서노이즈의 영향에 의해 제한된다. 반작용토크의 응답지연이 어느 정도 허용된다면, 내부 토크제어계의 비례이득을 작게 설정함으로써 대상물의 강성변화에 대하여 저감도한 반작용토크의 응답을 실현할 수 있다.

참고문헌

- (1) 則次俊郎, 和田力, 1990, “空氣壓サーボ系の制御性能評價とその特徴,” 油壓と空壓, Vol. 21, No. 4, pp. 417~424.
- (2) 則次俊郎, 和田力, 田寺孝光, 1990, “スライディングモード制御法を用いた空氣壓驅動ロボットの位置と力のハイブリット制御,” 計測自動制御學會論文集, Vol. 26, No. 3, pp. 331~338.
- (3) 則次俊郎, 角垣一志, 堂田周治郎, 1993, “空氣壓ロボットのコンプライアンスとその制御,” 日本ロボット學會誌, Vol. 11, No. 2, pp. 291~298.
- (4) Seraji, H., 1987, “Adaptive Force and Position Control of Manipulators,” *Journal of Robotics Systems*, Vol. 4, No. 4, pp. 551~578.
- (5) 志村康治, 堀洋一, 1993, “ロボットマニピュレータにおける力制御のロバスト化と衝突過程の制御,” 日本ロボット學會誌, Vol. 11, No. 2, pp. 235~245.
- (6) Komada, S., Nomura, K., Ishida, M., Ohnishi, K. and Hori, T., 1992, “Robust Force Control Based on Estimation of Environment,” *Proceedings of the 1992 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1362~1367.
- (7) 村上俊之, 大西公平, 1993, “作業環境のパラメータ推定に基づいた多自由度マニピュレータの力制御,” 日本電氣學會論文集, Vol. 113-D, No. 4, pp. 503~509.
- (8) Noritsugu, T. and Park, J. G., 1992, “Position Control of Pneumatic Robot Arms Using Disturbance Observer,” *Proceedings of the IFToMM-jc International Symposium on Theory of Machines and Mechanisms*, Vol. 1, pp. 395~400.
- (9) 朴最圭, 則次俊郎, 1993, “外亂オブザーバを用いた空氣壓ロボットの軌道制御,” 第71期日本機械學會全國大會講演論文集, Vol. F, pp. 58~60.
- (10) 則次俊郎, 朴最圭, 1994, “外亂オブザーバを用いた空氣壓ロボットの制御性能向上,” 日本ロボット學會誌, Vol. 12, No. 4, pp. 590~595.
- (11) 則次俊郎, 朴最圭, 1994, “壓力情報に基づく空氣壓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.
- (12) Chen, M. J. and Desoer, C. A., 1982, “Necessary and Sufficient for Robust Stability of Linear Distributed Feedback System,” *International Journal of Control*, Vol. 35, No. 2, pp. 255~267.
- (13) Chen, B. S. and Lo, C. H., 1989, “Necessary and Sufficient Conditions for Robust Stabilization of Perturbed Observer Based Compensating Systems,” *International Journal of Control*, Vol. 49, No. 3, pp. 937~960.