Proceedings of the 11th
KACC, October 1996

공기압 액츄에이터의 시간지연을 고려한 최적 서보제어

Optimal Servo Control of Pneumatic Actuator with Time-Delay

진 상 호

두원공업전문대학 기계과(TEL : 0334-676-6430, FAX : 0334-675-3320)

Abstract : In this paper, trajectory tracking control problems are described for a robot manipulator by using pneumatic actuator. Under the assumption that the so-called independent joint control is applied to the control system, the dynamic model for each link is identified as a linear second-order system with input time-delay by the step response. Then, an optimal servo controller is designed by taking account of such a time-delay. The effectiveness of the proposed control method is illustrated through some simulations and experiments for the robot manipulator.

Keywords : Optimal servo control, Time-delay, Pneumatic actuator, Robot manipulator, Independent joint control

1.서론

공기압 액츄에이터는 가격이 저렴하고 구조가 간단하며 전동기에 비하여 출력/중량비가 크므로 자동기계 및 자동화 설비 등의 액츄에이터로 많이 사용되고 있다. 최근에는 공기압 기기의 전자화, 고기능화 등으로 산업용 로봇의 액츄레이터로 많이 사용되고 있다[1,2]. 공기압 액츄레이터를 이용한 로봇은 스파크가 발생 하지 않으므로 폭발 및 발화 위험이 없으며 또한 공기의 압축성에 의해 저강성화가 가능하여 힘제어가 필요로 하는 조립 및 연마용 로봇의 연구가 진행되고 있다 [3,7,8]. 그러나 공기의 압축성 때문에 부하의 영향을 받기 쉬우며 시간지연이 생기는 등의 문제점이 있어서 제어하기 어려운 시스템으로 생각되어 진다.

본 연구에서는 공기압 시스템을 제어할때 문제시 되는 제어입력에 시간지연이 발생하는 시스템을 주어진 목표값에 최적으로 추종하는 서보제어기를 설계하였다. 제안된 제어기를 적용하여 컴퓨터 시뮬레이션 및 실제 2 링크 매니퓰레이터에 적용한 실험을 실시하여 유효성을 검토 하였다.

2. 최적 서보계의 설계

제어입력에 시간지연이 있는 시스템의 최적 서보계의 설계방법은 Y 형[4]과 직렬보상법[5]이 알려져있다. 전자는 미지 스텝외란 및 파라메터의 미소변동 등이 있어도 정상값에 영향을 주지 않는 강한 특성을 가지고 있으나 본 연구에는 외란을 고려 하지 않기 때문에 후자의 설계방법으로 제어기를 설계하였다.

공기압 시스템의 제어입력에 시간지연의 특성을 가진 제어대상을 다음과 같이 고려하였다.

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + bu(t-L) \tag{1}$$

$$y(t) = Cx(t) \tag{2}$$

$$e(t) = r(t) - y(t) \tag{3}$$

여기서 $x(t)$는 $n \times 1$의 상태변수, $u(t-L), y(t)$는 스칼라 입력 및 출력, $L>0$는 시간지연, r 은

$$\dot{r}(t) = 0, r(0) = r_0 \tag{4}$$

를 만족시키는 스텝 목표입력, e는 출력오차 이다. $t \to \infty$이며 $e(t) \to 0$에 가는 최적 서보입력 $u(t)$는 $t \to \infty$이며 일정한값을 가지므로 $\lim_{t\to\infty} \dot{u}(t) = 0$로 하고 $v(t) = \dot{u}(t)$를 제어입력으로 하면

$$\dot{\hat{x}}(t) = \hat{A}\hat{x}(t) + \hat{b}v(t-L) \tag{5}$$

$$e(t) = \hat{C}\hat{x}(t) \tag{6}$$

가 된다. 여기서

$$\hat{x}(t) = \begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ e(t) \end{bmatrix}, \qquad \hat{A} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ -C & 0 \end{bmatrix}$$

$$\hat{b} = \begin{bmatrix} b \\ 0 \end{bmatrix}, \qquad \hat{C} = [0 \quad 1]$$

$$v(t-L) = \dot{u}(t-L)$$

이다. 그리고 본 연구에서는 최적 서보문제를 regulator 문제로 귀착시켜서 거기에 대응하는 riccati 방정식으로 서보 이득을 구하기 위하여 시간지연이 없는 경우의 최적서보계[6]의 확대계를 사용하기로 한다. 식 (5)에 대하여 $\xi(t)$를

$$\xi(t) = e^{\hat{A}L}\hat{x}(t) + \int_{t-L}^{t} e^{\hat{A}(t-\tau)}\hat{b}v(\tau)d\tau \tag{7}$$

로 하면

$$\dot{\xi}(t) = \hat{A}\xi(t) + \hat{b}v(t) \tag{8}$$

가 성립한다. 제어신호 $v(t)$를

$$v(t) = F\xi(t) \equiv F\hat{x}(t+L) \tag{9}$$

로 한다. 이 $v(t)$는 식 (7)을 사용해서

$$\begin{aligned} v(t) &= Fe^{\hat{A}L}\hat{x}(t) + F\int_{t-L}^{t} e^{\hat{A}(t-\tau)}\hat{b}v(\tau)d\tau \\ &= \begin{bmatrix} F_1 & F_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{AL} & 0 \\ -\int_0^L Ce^{A\tau}d\tau & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ e(t) \end{bmatrix} \\ &\quad + F\int_{t-L}^{t} e^{\hat{A}(t-\tau)}\hat{b}v(\tau)d\tau \\ &= \overline{F}_1\dot{x}(t) + F_2 e(t) + F\int_{t-L}^{t} e^{\hat{A}(t-\tau)}\hat{b}v(\tau)d\tau \end{aligned} \tag{10}$$

를 구할 수 있다. 여기서

$$F = \begin{bmatrix} F_1 & F_2 \end{bmatrix} \tag{11}$$

$$\overline{F}_1 = F_1 e^{AL} - F_2\int_0^L Ce^{A\tau}d\tau \tag{12}$$

$$\dot{x}(t) = \begin{bmatrix} \dot{\theta} & \ddot{\theta} \end{bmatrix}^T \tag{13}$$

이다. 실제 제어대상의 제어입력은

$$u(t) = \int_0 v(t) \tag{14}$$

가된다. 그림 1 은 입력에 시간지연의 특성을 가진 최적 서보제어기의 블록선도를 나타낸다.

3. 시뮬레이션

본 제어기의 유효성을 알기위하여 제어대상을 2 링크 매니퓰레이터[7]에 적용하여 계산기 시뮬레이션을 실시 하였다.

3.1 제어대상

여기서 제어대상은 2 차 선형계의 진동모델로 한다. 독립 관절 제어법을 적용하고 제어입력의 시간지연을 고려하면 그 선형 모델은

$$\ddot{\theta}_i(t) + 2\zeta_i\omega_{ni}\dot{\theta}_i(t) + \omega_{ni}^2\theta_i(t) = 1/I_i\, u_i(t-d_i) \tag{15}$$

로 나타낼 수 있다. 여기서 θ_i는 링크 i 의 관절각, ζ_i는 링크 i 의 감쇠비, ω_{ni}는 고유진동수, I_i는 링크 i 의 관성 모멘트, u_i는 링크 i 의 구동 토크, d_i는 시간지연이다. 파라메터를 정리하여 다시 쓰면 식(15)는

$$\ddot{\theta}_i(t) + a_i\dot{\theta}_i(t) + b_i\theta_i(t) = c_i u_i(t-d_i) \tag{16}$$

와 같이 된다. 단 이 경우 u_i는 링크i 의 구동 입력 전압이다. 시뮬레이션에 사용한 파라메터의 값은 식 (17), (18)과 같다.

$$\begin{aligned} &a_1 = 3.3[1/s], \quad b_1 = 108.2[1/s^2] \\ &c_1 = 82.6[rad/vs^2], \quad d_1 = 80[ms] \end{aligned} \tag{17}$$

$$\begin{aligned} &a_2 = 32.5[1/s], \quad b_2 = 784[1/s^2] \\ &c_2 = 511.5[rad/vs^2], \quad d_2 = 0[ms] \end{aligned} \tag{18}$$

3. 2 시뮬레이션 방법과 결과

이상의 입력에 시간지연을 고려한 최적 서보제어기를 사용하여 계산기 시뮬레이션을 실시 하였다.

식(16) ~ (18)의 미분방정식은 상호 독립된 모델이지만 1 계의 벡터 미분방정식으로 변환시켜 4 차의 Runge-Kutta-Gill 법을 사용하여 스텝폭을 10[ms] 로 하여 시뮬레이터했다. 제어의 샘플링 시간은 매니퓰레이터의 응답의 시간지연이 약 80[ms]이기때문에 실제의 실험을 할 때의 샘플링폭을 고려하여 40[ms]로 하였다. 입력에 시간지연이 있는 링크 1 에 관하여서는 실제의 제어대상에 입력되는 입력전압은 식(14)에서 계산한 현시각의 제어입력을 1 샘플링 시각을 늦춘것이 된다. 상태추이 행렬은 9 항 까지의 급수전개계산을 하였다.

초기조건을 θ_1=0.722[rad] , θ_2=0.562[rad]로 한다. 반경이 30[mm]의 원궤적을 추종하는 실험을 하기위한 작업좌표계에서의 궤도는

$$x(t) = 30\cos(\pi t/5) + 290 \tag{19}$$

$$y(t) = 30\sin(\pi t/5) + 360 \tag{20}$$

로 하였다. 단, 궤도주기는 10 초이다. 관절좌표계에서의 목표각도 $\theta_d(t) = \begin{bmatrix} \theta_{1d}(t), & \theta_{2d}(t) \end{bmatrix}^T$는

$$\theta_{1d}(t) = a\tan 2(y,x) - a\tan 2(k, x^2+y^2+l_1^2-l_2^2) \tag{21}$$

$$\theta_{2d}(t) = a\tan 2(k, x^2+y^2-l_1^2-l_2^2) \tag{22}$$

$$k = \sqrt{(x^2+y^2+l_1^2+l_2^2)^2 - 2[(x^2+y^2)^2 + l_1^4 + l_2^4]} \tag{23}$$

이다. 목표 각속도 $\dot{\theta}_d(t) = \begin{bmatrix} \dot{\theta}_{1d}(t), & \dot{\theta}_{2d}(t) \end{bmatrix}^T$와 목표 각가속도 $\ddot{\theta}_d(t) = \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_{1d}(t), & \ddot{\theta}_{2d}(t) \end{bmatrix}^T$는 자코비언 행렬 J를 사용하여

$$\dot{\theta}_d(t) = J^{-1}\dot{X}_d(t) \tag{24}$$

$$\ddot{\theta}_d(t) = J^{-1}[\ddot{X}_d(t) - \dot{J}\dot{\theta}_d(t)] \tag{25}$$

로 주어진다. 여기서

$$J = \begin{bmatrix} -(l_1S_1 + l_2S_{12}) & -l_2S_{12} \\ l_1C_1 + l_2C_{12} & l_2C_{12} \end{bmatrix}$$

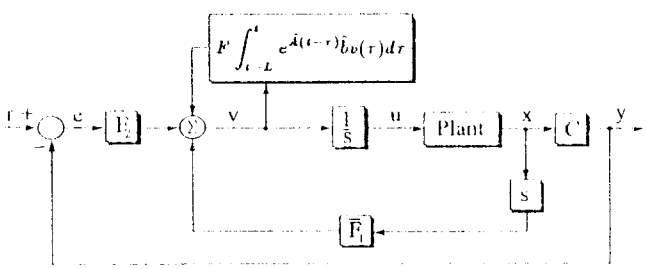

그림 1. 시간지연을 고려한 최적 서보제어기의 블록선도

Fig. 1. Block diagram of an optimal servo controller taking account of the time-dely L

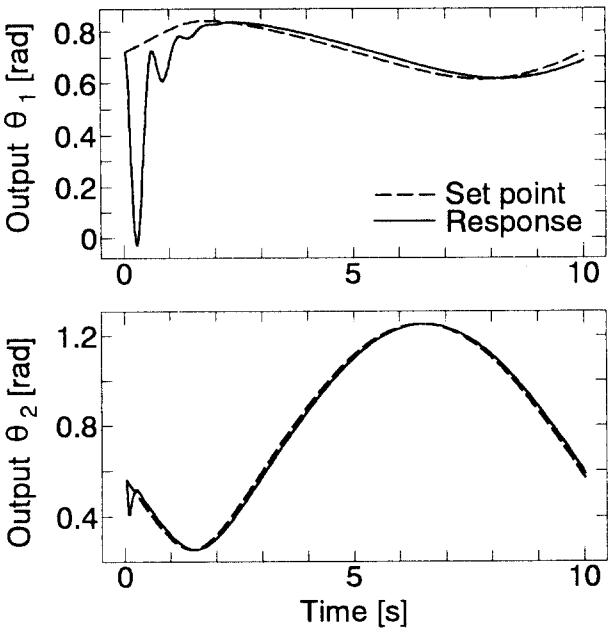

그림 2. 시간지연을 고려한 최적 서보제어기를 사용한 시뮬레이션 결과

Fig. 2. Simulation results of an optimal servo controller taking account of the time-dely

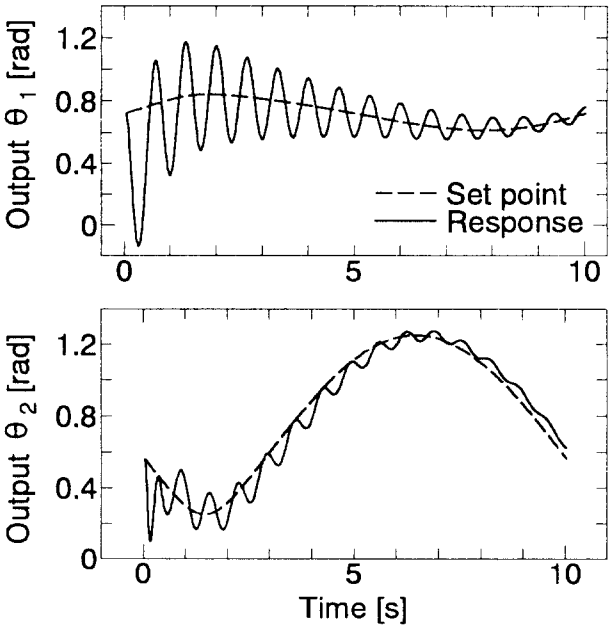

그림 3. 시간지연을 고려하지 않았을 때의 시뮬레이션 결과

Fig. 3. Simulation results of an optimal servo controller without taking of the time-dely

$$J^{-1} = 1/\Delta \begin{bmatrix} l_2 C_{12} & l_2 S_{12} \\ -(l_1 C_1 + l_2 C_{12} & -(l_1 S_1 + l_2 S_{12}) \end{bmatrix}$$

$$\Delta = -l_1 l_2 (S_1 C_{12} - C_1 S_{12})$$

$$\dot{J} = \begin{bmatrix} -[l_1 C_1 \dot{\theta}_{1d} + l_2 C_{12} (\dot{\theta}_{1d} + \dot{\theta}_{2d})] \\ -[l_1 S_1 \dot{\theta}_{1d} + l_2 S_{12} (\dot{\theta}_{1d} + \dot{\theta}_{2d})] \\ -l_2 C_{12} (\dot{\theta}_{1d} + \dot{\theta}_{2d}) \\ -l_2 S_{12} (\theta_{1d} + \dot{\theta}_{2d}) \end{bmatrix}$$

로 한다. 단

$$S_1 = \sin\theta_{1d}, \quad S_{12} = \sin(\theta_{1d} + \theta_{2d})$$
$$C_1 = \cos\theta_{1d}, \quad C_{12} = \cos(\theta_{1d} + \theta_{2d})$$

이다. 그림 2 는 시간지연을 고려한 최적 서보기를 이용한 경우의 결과를 나타낸다. 최적 피이드백 이득 행렬은 링크 1 은 F = [-0.60692, -0.08085, 7.45355] 이며 링크 2 는 F = [-3.12786, -0.08906, 57.73502]이다. 가중행렬(weights)은 링크 1 이 Q = diag(0, 0, 1000), R = 18, 이며 링크 2 는 Q = diag(0, 0, 1000), R = 0.3 이다. 이 결과에서 알 수 있는 바와 같이 최초에 언드슈트가 있지만 주어진 목표궤도에 추종하고 있다.

시간지연을 고려하지 않았을 때의 결과를 그림 3 에 나타내었다. 시간지연을 고려 하였을때와 같은 피이드백 이득 행렬에서는 제어응답이 발산하기 때문에 최적 피이드백 이득 행렬은 각각 F = [-0.19042, -0.03416, 3.16227], F = [-0.38603, -0.01553, 7.07106]로 하였다. 단 가중행렬은 링크 1 이 Q = diag(0, 0, 1000), R = 100 이며, 링크 2 가 Q = diag(0, 0, 1000), R = 20 이다. 링크 1 은 시간지연의 모델화 오차에서 매우 진동 경향이 강하며 또 그 영향은 링크 2 에도 미치고 있는 것을 그림으로 부터 알 수 있다.

4. 실기의 실험결과

실제의 인공고무근육을 사용한 2 링크 매니퓰레이터[7]로 원궤적을 추종하는 제어 실험을 하였다. 제어 샘플링 폭은 시뮬레이션과 같이 하고 공기의 압력은 $6[kg/cm^2]$로 하였다. 초기조건은 각 관절각이 0[rad] 이 되도록 링크 1 의 초기전압을 2.2 [v], 링크 2 는 2.4 [v]로 하였다. 궤도는 시뮬레이션과 같은 반경 30 [mm] 의 원궤도 추종 실험을 실행 하였다.

그림 4 는 시간지연을 고려 하였을 때의 실험결과이다. 여기서 사용한 최적 피이드백 이득 행렬은 모델화 오차를 고려하여, 시뮬레이션에서 구한 값을 약간 수정한 값이다. 링크 1 은 F = [-0.56622, -0.07705, 7.07106]이며 링크 2 는 F = [-0.66639, -0.02540, 11.95228]이다. 가중행렬은 링크 1 이 Q=diag(0, 0, 1000),

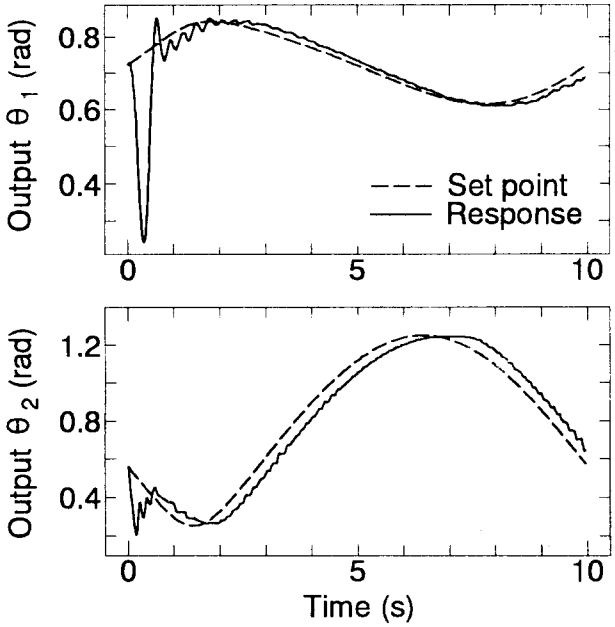

그림 4. 시간지연을 고려한 최적 서보제어기를 사용한 실제실험 결과

Fig. 4. Experimental results of an optimal servo controller taking account of the time-dely

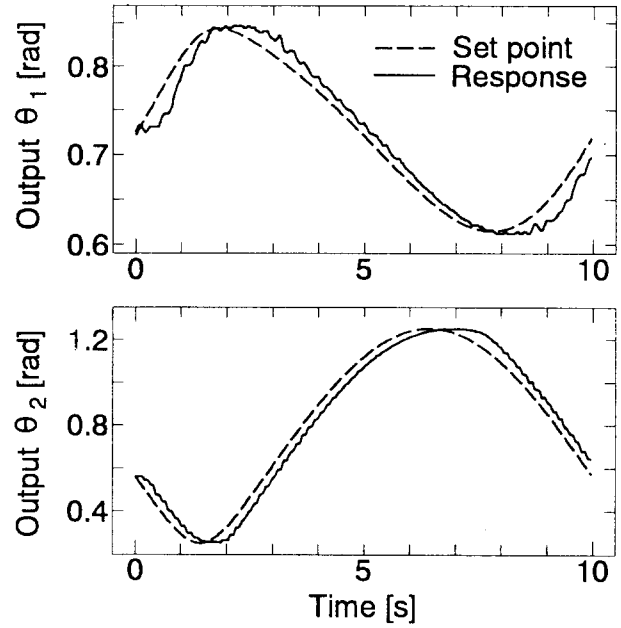

그림 5. 시간지연을 고려한 최적 서보제어기를 사용한 실제실험결과(전압변화를 고려)

Fig. 5. Experimental results of an optimal servo controller taking account of time-dely (control of workstarting voltage)

R=20, 링크 2 가 Q=diag(0, 0, 1000), R=6 이다. 링크 1 의 경우 시뮬레이션의 결과와 거의같은 결과를 얻을 수 있었다. 링크 2 는 적분 동작을 고려하지 않았기 때문에 모델화 오차에 의하여 약간의 정상편차가 있다. 과도의 언드슈트는 작업좌표계에서 작업 시작점의 전압변화를 고려함에 의해서 개선 되었다. 개선된 결과를 그림 5 에 나타내었다.

5. 결론

공기압 시스템을 제어할 때 문제시 되는 제어입력에 시간지연을 고려한 최적 서보계를 설계하였다. 시뮬레이션 및 실기의 실험을 통하여 설계한 제어기의 유효성을 확인 하였다. 시뮬레이션 결과에서 고찰한 것과 같이 과도의 언드슈트가 크다. 이것은 최적 제어의 하나의 특징이다. 그러나 실기의 실험에서 언드슈트는 작업좌표계에서 작업 시작점의 전압변화를 고려함에 의하여 개선 시킬 수 있었다.

참고문헌

[1] W. Yamahuzi, "Pneumatic Actuators and its Application to Robot Control," *J. of the Robottics Society of Japan*, Vol. 9, N0. 4, pp.498-501, 1991. (in Japanese)

[2] T. Noritsugu and J. Park,"Position Control of Pneumatic Robot Arms Using Disturbance Observer," *Proceeding of the IFToMMjc International Symposium on Theory of Machines and Mechanisms*, Vol.. 1, pp. 395-400, 1992.

[3] T. Noritsugu, T. Wada and N. Nishiguchi,"Force Control of a pneumatic Servo System with Adaptive Control, " *Journal of the Society of instrument and Control Engineers*, Vol. 26, No. 2, pp. 196-203, 1990. (in Japanese)

[4] K. Watanabe,"Predictor Control Having the Y-Type Servo Structure for Systems with Delay in Input," *Journal of the Society of instrument and Control Engineers*, Vol. 21, No. 9, pp. 928-933, 1985. (in Japanese)

[5] K. Watanabe, and M. Sato,"A Process-Model Control for Multivariable Systems with Multiple Delays in Inputs and Outputs Subject to Unmeasurable Disturbances, " *International J. of Control*, Vol. 39-1, pp. 1-17, 1984.

[6] K. Furuta and K. Komiya, "Synthesis of Model Following Servo Controller for Multivariable Linear System, " *Journal of the Society of instrument and Control Engineers*, Vol. 18, No. 1, pp.8-14, 1982. (in Japanese)

[7] 진상호, 게이고 와타나베, 이석규,"고무인공근 로보트 매니퓨레이터의 위치 및 힘 제어에 관한 연구, "한국정밀공학회, 제 12 권 제 1 호, pp.97-103, 1995.

[8] 박정규, 노리츠구 토시로,"공압 매니퓰레이터의 강인 힘제어,"대한기계학회논문집(A), 제 20 권 제 2 호, pp. 540-552, 1996.