

본 연구는 연세대학교 95년도 학술연구비에 의하여 수행되었으며 본 연구에 도움을 주신 분께 깊은 감사를 표합니다.

공압인공근육로봇의 궤적추종의 적응제어

박형욱*, 박노철*, 양현석**, 박영필**

Adaptive Control for Trajectory Tracking of a Manipulator with Pneumatic Artificial Muscle Actuators

H.W. Park*, N.C. Park*, H.S. Yang**, Y.P. Park**

ABSTRACT

A pneumatic artificial muscle type of actuator, which acts similar to human muscle, is developed recently. In this paper, an adaptive controller is presented for the trajectory tracking problem of a two-degree-of-freedom manipulator using two pairs of pneumatic artificial muscle actuators. Due to the nonlinearity and the uncertainty on the dynamics of the actuator, it is difficult to make the effective control schemes of this system. By the adaptive control law which includes a nonlinear "feedforward" term compensating parametric uncertainties in addition to P.I.D. scheme, both global stability of the system and convergence of the tracking error are guaranteed. The effectiveness of the proposed control method for the manipulator using this actuator is illustrated through experiments.

Key Words : Pneumatic Artificial Muscle(공압인공근육), Manipulator(조작기), Adaptive Control(적응제어), Trajectory Tracking Control(궤적추종제어)

1. 서론

로봇을 산업에 응용하려는 노력은 주로 생산성향상, 쾌적한 노동환경의 정비, 신체부자유자의 인력활용 등의 목적으로 이루어져 왔다. 최근에는 간호용 로봇 등과 같이 특수한 용도로 사용범위가 점점 넓어지고 있으나 안전성 및 유연성과 같은 여러 가지의 제약으로 인하여 일반 산업용 로봇의 구동기로서는 적용에 한계가 있으며, 특수한

용도에 알맞은 구동기의 개발이 시급한 추세이다. 로봇 등에 사용되는 구동기(actuator)의 구동방식은 크게 전기 구동식, 유압 및 공압 구동식으로 대별 할 수 있으며, 이 중 전기 또는 유압식 구동기는 출력이 크고 강성이 높아 부하변동에 따른 영향이 작으며, 공압 구동식에 비해 상대적으로 많은 장점을 가지고 있어, 산업용 로봇 등에 주로 사용되고 있다. 그러나 간호용 로봇 등 인간과 작업 공간을 같이하는 경우에는 기존에 널리 사용되는 구동

* 연세대학교 대학원 기계공학과
 ** 연세대학교 기계공학과

기가 가지고 있는 고출력, 고강성 등의 장점이 오히려 큰 위험요소가 될 수도 있다. 또한 도장작업과 같이 폭발 및 발화위험이 있는 작업조건에서는 스파크 발생위험이 많은 전기식 구동기를 사용하는데 한계가 있다. 최근 선진국에서는 이러한 제약들을 극복하기 위해, 인간의 근육과 비슷한 운동특성을 가지면서 안전성과 유연성을 확보할 수 있는 구동기에 대한 연구가 활발히 진행되고 있는데, 이러한 노력의 일환으로 개발된 것으로는 공압인공근육(Pneumatic Artificial Muscle)이 있으며, 다양한 분야에의 응용이 기대되고 있다^(1,2,3,4). 이 구동기는 압축공기에 의해 구동되므로 전기식 구동기를 사용할 수 없는 조건에서도 사용가능하며, 유압 구동기에서 발생할 수 있는 오염에 대한 가능성이 매우 작다. 또한 최대 300N의 큰 힘이 발생 가능하고, 힘의 제어뿐만 아니라 구동기의 유연성에 대한 제어도 가능하며, 인간과 밀접한 작업환경에서 그 유용성이 기대되고 있다. 그러나 이 구동기는 히스테리시스를 비롯한 비선형성이 있으며, 공기의 압축성, 밸브 및 배관계의 유량특성 등에 의해 응답지연이 발생하고, 부하에 대한 영향을 받기 쉽다는 등 구동기로서 많은 문제를 가지고 있다. 또한 정확한 모델링이 어려울 뿐 아니라, 구동기에 대한 제어도 매우 복잡해지게 된다. 대부분의 경우 공압인공근육을 이용한 강체조작기의 제어에 대한 연구는 구동기를 포함한 계를 선형계로 모델링하여 수행한다. 陳相浩등⁽⁵⁾은 토오르제산제어(computed torque control) 및 시간지연을 고려한 최적서보제어를 적용하여 공압인공근육을 이용한 2자유도 조작기의 궤적 추종제어를 행하였다. Osuka등⁽⁶⁾은 이 구동기를 이용한 1자유도 조작기에 H_{∞} 제어이론을 적용하여, 구동기에 대한 선형 모델이 가지는 불확실성에 대해서 강인(robust)한 제어결과를 얻었다. 공압식 구동기를 사용한 조작기에 대한 적용제어로서는, McDonnell등⁽⁷⁾의 공압실린더를 사용한 1자유도 조작기에 대한 적용추종제어에 관한 연구가 있다. 본 논문에서는 공압인공근육의 특징을 이용한 특수 목적 로봇에 대한 기초연구로서, 공압인공근육에 의해 구동되는 2관절 수직로봇을 제작하고, 회전각에 대한 추종제어를 행하였다. 서보밸브와 구동기에 관련된 선형화된 관계식을 얻고, 이를 2자유도 조작기의 비선형 동적 관계식에 연동시켜, 전체계의 비선형 모델을 설정하였다. 링크 파라미터의 불확실성, 부하질량(payload)의 변화, 그리고 구동기와 서보밸브 관계식에서의 파라미터에 대한 불확실성 때문에, 위의 비선형 모델은 불확실한 파라미터를 갖게 된다. 이에 대해 적응제어기를

설계하여, 이러한 불확실한 파라미터를 추정하고, 그 추정 값을 기본으로 회전각에 대한 추종제어를 행하였다. 또한 조작기 동작 중 끝단에 부하질량을 추가하거나, 목표회전각의 진폭 및 주기를 변화시키는 실험을 행하여, 각각의 경우에 대한 제어계의 안정성과 추종제어성능을 고찰하였다.

2. 실험장치

2.1 구동기

구동기는 Fig. 1 과 같이 2층의 실린더로 구성되어 있다. 내층은 공기압 저장용기 역할을 하는 고무튜브로 되어 있으며, 이 고무튜브 주위로 고장력 나일론 섬유가 격자모양으로 짜여 씌워진 형태로 되어 있다. 내층의 고무튜브와 나일론 섬유는 양단의 고정 금속 캡을 통해 체결되어 있다.

튜브 내부에 공기압을 가하면 외경이 늘어나면서 섬유 격자의 힘변환 작용에 의해 축 방향으로 수축하는 힘이 발생하는데, 이는 근육의 동작과 매우 유사하고 수축률이 증가하면 수축력이 감소하는 등 인간의 근육과 유사한 동작 특성을 가지고 있다. 구동기에 가하는 공기압을 변화시킴으로써 구동기의 수축률, 수축력 및 강성을 제어할 수 있으며, 고무, 나일론 섬유 등으로 구성되어 있어 무게가 매우 가벼운 반면 발생력은 매우 커서 자중 대비 최대 2000 배의 수축력을 발생시킬 수 있는 장점을 가지고 있다.

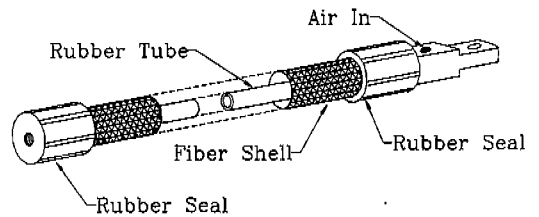


Fig. 1 Pneumatic Artificial Muscle Actuator

양 구동기에 똑같이 기준압 P_0 를 가하였을 때는 기준위치에서 평형을 이루게 되며, 한쪽 구동기의 압력을 ΔP 만큼 증가시키고 다른 쪽 구동기는 ΔP 만큼 감소시키면, 압력이 높아진 구동기 쪽으로 회전한 상태에서 평형을 이루게 된다. 이때 조작기의 회전강성 G_a 는 다음의 식 (1) 과 같이 표현할 수 있다⁽¹⁰⁾.

$$G_a = 2\alpha(r_p^2/L_o)P_0 \quad (1)$$

여기서 L_o 는 구동기의 초기 유효길이를, P_o 는 기준 압력을 나타낸다. 또한 r_p 는 폴리반경을, a 는 수축에 관련된 구동기의 고유 파라미터를 각각 나타낸다. 또한 본 논문에서 사용된 공압인공근육의 사양은 표 1과 같다.

Table 1. Specification of the actuators

Axis	Diameter	Length	Maximum Contraction ratio	Initial Length
1	0.023m	0.25m	0.2	0.225m
2	0.016m	0.20m	0.2	0.2m

2.2. 계의 모델링

공압인공근육 구동기의 내압을 P 로 하였을 때의 수축력은 식 (2)와 같다⁽¹⁰⁾.

$$F = P(\beta - \alpha\varepsilon) - \gamma \quad (2)$$

여기서 α, β, γ 는 구동기의 수축력의 특성에 관련된 계수이며 ε 는 구동기의 수축률이다. Fig. 3과 같이 각 구동기의 압력을 기준압 P_o 에서 ΔP , $-\Delta P$ 만큼 변화시킨 경우, 폴리에서의 발생 토크 T 는 식 (3)과 같다.

$$\begin{aligned} T &= r (F_a - F_b) \\ T &= r [(P_o + \Delta P)\{\beta - \alpha(\varepsilon_o + \Delta\varepsilon)\} \\ &\quad - (P_o - \Delta P)\{\beta - \alpha(\varepsilon_o - \Delta\varepsilon)\}] \\ T &= 2r(\beta - \alpha\varepsilon_o)\Delta P - 2r\alpha P_o \Delta\varepsilon \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 F_a, F_b 는 각각의 구동기의 수축력을, r 은 폴리의 반경을 나타내며, 또한 ε_o 는 기준위치에서의 구동기의 수축률을 나타낸다. ΔP 에 의한 수축률의 변화량 $\Delta\varepsilon$ 은 식(4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta\varepsilon = r\theta / L_o \quad (4)$$

여기서 θ 는 기준위치로부터의 폴리의 회전각을, L_o 는 기준위치에서의 구동기의 길이를 각각 나타낸다. 식 (4)를 식 (3)에 대입하여 정리하면 식 (5)와 같다.

$$T = -G_a\theta + K_p \Delta P \quad (5)$$

여기서 회전강성계수 G_a 와 구동기 토크 상수 K_p 는 식(6),(7)과 같이 정의된다.

$$G_a = 2\alpha(r^2 / L_o)P_o \quad (6)$$

$$K_p = 2r(\beta - \alpha\varepsilon_o) \quad (7)$$

배관계의 압력손실 및 압축공기의 동특성 등을 무시하여 공압서보밸브의 출력압력과 구동기의 내압이 같다고 가정하고, 이때의 압력, 즉 서보밸브의 출력압력은 밸브에 대한 제어전압에 직접 비례한다고 공압서보밸브의 거동을 모델링하면 다음의 식 (8)이 성립한다.

$$\Delta P = K_v u \quad (8)$$

여기서 K_v 는 서보밸브의 게인이고, u 는 기준압 P_o 를 유지하기 위한 서보밸브의 입력전압 u_o 로부터의 전압 변화량이다. 식 (8)을 식 (5)에 대입하면 식 (9)와 같다.

$$T = -G_a\theta + K_T u \quad (9)$$

여기서 K_T 는 구동기 및 서보밸브에 대한 토크 상수로 정의되며 식 (10)과 같은 관계를 만족한다.

$$K_T = K_p K_v > 0 \quad (10)$$

2자유도 수직회전 조작기의 비선형운동방정식은 식 (11)과 같다^(8,9).

$$H\ddot{\theta} + C\dot{\theta} + T_d \operatorname{sgn}(\dot{\theta}) + \underline{G} = \tau \quad (11)$$

여기서 $\theta = \{\theta_1 \ \theta_2\}^T$, $\underline{\tau} = \{T_1 \ T_2\}^T$ 이고, $\theta_i, T_i, (i=1,2)$ 는 각 관절의 회전각 및 토크를 나타낸다. 또한 $T_d \operatorname{sgn}(\dot{\theta}) = \{T_{d1} \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_1) \ T_{d2} \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_2)\}^T$ 이고, $T_{di}, (i=1,2)$ 는 각 축의 동마찰 계수를 나타낸다. H 는 관성행렬을 나타내고, 식 (12)와 같은 요소를 가진다.

$$\begin{aligned} H_{11} &= a_1 + 2a_3 \cos\theta_2 + 2a_4 \sin\theta_2 \\ H_{12} = H_{21} &= a_2 + a_3 \cos\theta_2 + a_4 \sin\theta_2 \\ H_{22} &= a_2 \end{aligned} \quad (12)$$

여기서

$$\begin{aligned} a_1 &= I_1 + m_1 l_{c1}^2 + I_2 + m_2 l_{c2}^2 + m_2 l_1^2 \\ a_2 &= I_2 + m_2 l_{c2}^2 \\ a_3 &= m_2 l_1 l_{c2} \cos\delta \\ a_4 &= m_2 l_1 l_{c2} \sin\delta \end{aligned}$$

이다.

벡터 $C(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta}$ 는 구심토크와 코리올리 토크이고, 본 논문에서는 $\dot{H} - 2C$ 가 비대칭(Skew-Symmetric)이 되도록 행렬 C 의 각 요소를 다음의 식 (13)과 같이 하였다.⁽⁸⁾

$$C_{ij} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n \frac{\partial H_{jk}}{\partial q_k} q_k + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n \left(\frac{\partial H_{ik}}{\partial q_j} - \frac{\partial H_{jk}}{\partial q_i} \right) q_k \quad (13)$$

여기서

$$\begin{aligned} C_{11} &= -h\theta_2 \\ C_{12} &= -h(\theta_1 + \theta_2) \\ C_{21} &= h\theta_1 \\ C_{22} &= 0 \\ h &= a_3 \sin \theta_2 - a_4 \cos \theta_2 \end{aligned}$$

이다.

그리고 중력토크 벡터 \underline{G} 의 요소는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} G_1 &= a_5 \sin \theta_1 + a_6 \sin(\theta_1 + \theta_2) \\ G_2 &= a_6 \sin(\theta_1 + \theta_2) \\ a_5 &= -m_1 g l_{c1} - m_2 g l_1 \\ a_6 &= -m_2 g l_{c2} \end{aligned}$$

여기서 I_i 는 각 링크의 무게중심에 대한 회전 관성 모멘트, m_i 는 질량, l_i 는 링크의 길이, l_{ci} 는 회전축과 무게중심 사이의 거리를 나타내고, g 는 중력가속도를 나타낸다. 또한 δ 는 부하질량의 편심으로 인하여 발생되는, 2번째 링크의 중심선으로부터 무게중심의 편심각을 나타낸다. 식 (9)를 식 (11)에 대입하여 정리하면 식 (14)를 얻을 수 있다.

$$H\ddot{\theta} + C\dot{\theta} + \underline{T}_d \operatorname{sgn}(\dot{\theta}) + \underline{G} + \underline{G}_a \dot{\theta} = \underline{K}_T u \quad (14)$$

여기서 $\underline{u} = \{u_1, u_2\}^T$, $\underline{K}_T = \operatorname{diag}\{K_{T1}, K_{T2}\}$, $\underline{G}_a = \operatorname{diag}\{G_{a1}, G_{a2}\}$ 이고, $u_i, K_{Ti}, G_{ai}, (i=1,2)$ 는 각 축에 대한 제어입력, 토크상수, 그리고 회전강성계수이다.

3. 제어기의 설계

3.1 제어기 설계

수직회전조작기에 대한 운동방정식의 계수는 부하질량의 변화, 구동기 및 서보밸브의 관계식에서의 파라미터의 불확실성, 그리고 링크파라미터의 불확실성 등으로 인하여 그 값을 정확히 결정하는 것은 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 식 (15)와 같은 미지의 상수파라미터 벡터 \underline{a} 를 도입하고, 제어기에 이에 대한 적응법칙(Adaptation Law)을 포함시켜, 제어입력에 미지의 파라미터에 대한 추정치가 반영되도록 하였다.

$$\underline{a} = [a_1 \ a_2 \ a_3 \ a_4 \ a_5 \ a_6 \ G_{a1} \ G_{a2} \ T_{d1} \ T_{d2}]^T \quad (15)$$

\underline{a} 에 대한 추정치 벡터를 $\hat{\underline{a}}$ 라 하면 파라미터추정오차 $\tilde{\underline{a}}$ 는 식 (16)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\tilde{\underline{a}}(t) = \hat{\underline{a}}(t) - \underline{a} \quad (16)$$

각 축의 궤적추종오차의 정도를 나타내는 벡터 \underline{s} 를 다음의 식 (17)과 같이 정의한다.⁽¹¹⁾

$$\begin{aligned} \underline{s}(t) &= \dot{\tilde{\theta}}(t) + 2\Lambda \tilde{\theta}(t) + \\ &+ \Lambda^2 \int_0^t \tilde{\theta}(r) dr - \dot{\tilde{\theta}}(0) - 2\Lambda \tilde{\theta}(0) \end{aligned} \quad (17)$$

여기서

$$\tilde{\theta}(t) = \theta(t) - \theta_d(t) \quad (18)$$

이고, $\theta_d(t)$ 는 조작기의 목표궤적을 나타낸다. 또한 $\Lambda = \operatorname{diag}\{\lambda_1, \lambda_2\}$ 이고, $\lambda_i, (i=1,2)$ 는 양의 상수이다. 식 (20)과 같이 $\dot{\theta}_r(t)$ 를 도입하여 식 (17)을 다음의 식 (19)와 같이 나타낸다.

$$\underline{s}(t) = \dot{\theta}(t) - \dot{\theta}_r(t) \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \dot{\theta}_r(t) &= \dot{\theta}_d(t) - 2\Lambda \tilde{\theta}(t) \\ &- \Lambda^2 \int_0^t \tilde{\theta}(r) dr + \dot{\tilde{\theta}}(0) + 2\Lambda \tilde{\theta}(0) \end{aligned} \quad (20)$$

식 (21)과 같은 Lyapunov 함수(Lyapunov function candidate)를 고려한다.⁽⁹⁾

$$V = \frac{1}{2} [\underline{s}^T H \underline{s} + \tilde{\underline{a}}^T \Gamma^{-1} \tilde{\underline{a}}] \quad (21)$$

여기서 Γ 는 대칭인 양의 한정(Positive Definite) 계인 행렬이다. 식 (21)을 시간에 대해 미분하면 식(22)와 같다.

$$\dot{V} = \underline{s}^T H(\ddot{\theta} - \ddot{\theta}_r) + \hat{\underline{a}}^T \Gamma^{-1} \dot{\underline{a}} + \frac{1}{2} \underline{s}^T \dot{H} \underline{s} \quad (22)$$

식 (22)의 $H\ddot{\theta}$ 에 식(14)를 대입하면 다음의 식 (23)을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) = & \underline{s}^T \{K_T \underline{u} - H\ddot{\theta}_r - C\dot{\theta}_r \\ & - T_d \operatorname{sgn}(\dot{\theta}) - \underline{G} - G_a \theta\} + \\ & \hat{\underline{a}}^T \Gamma^{-1} \dot{\underline{a}} + \frac{1}{2} \underline{s}^T (\dot{H} - 2C) \underline{s} \end{aligned} \quad (23)$$

식 (24)와 같은 요소를 갖는 행렬 Y 를 도입하면, 식 (25)와 같이 식 (23)의 괄호 안의 항은 미지의 파라미터 벡터 \underline{a} 의 선형관계식으로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} Y_{11} = & \ddot{\theta}_{r1}, Y_{12} = \ddot{\theta}_{r2}, Y_{21} = 0 \\ Y_{22} = & \ddot{\theta}_{r1} + \ddot{\theta}_{r2} \\ Y_{13} = & (2\ddot{\theta}_{r1} + \ddot{\theta}_{r2}) \cos \theta_2 - \\ & (\dot{\theta}_2 \dot{\theta}_{r1} + \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_{r2} + \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_{r2}) \sin \theta_2 \\ Y_{14} = & (2\ddot{\theta}_{r1} + \ddot{\theta}_{r2}) \sin \theta_2 + \\ & (\dot{\theta}_2 \dot{\theta}_{r1} + \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_{r2} + \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_{r2}) \cos \theta_2 \\ Y_{23} = & \ddot{\theta}_{r1} \cos \theta_2 + \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_{r1} \sin \theta_2 \\ Y_{24} = & \ddot{\theta}_{r1} \sin \theta_2 - \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_{r1} \cos \theta_2 \\ Y_{15} = & \sin(\theta_1), Y_{26} = \sin(\theta_1 + \theta_2) \\ Y_{17} = & \theta_1, Y_{28} = \theta_2 \\ Y_{19} = & \operatorname{sgn}(\theta_1), Y_{2,10} = \operatorname{sgn}(\theta_2) \\ Y_{16} = & Y_{18} = Y_{1,10} = Y_{25} = Y_{27} = Y_{29} = 0 \end{aligned} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} H\ddot{\theta}_r + C\dot{\theta}_r + T_d \operatorname{sgn}(\dot{\theta}) + \underline{G} + G_a \theta \\ = \underline{Y} \underline{a} \end{aligned} \quad (25)$$

식 (25)의 관계와, $\dot{H} - 2C$ 이 비대칭(skew symmetric)행렬이라는 성질을 이용하면, 식 (23)을 식 (26)과 같이 정리할 수 있다.⁽⁸⁾

$$\dot{V}(t) = \underline{s}^T (K_T \underline{u} - \underline{Y} \underline{a}) + \hat{\underline{a}}^T \Gamma^{-1} \dot{\underline{a}} \quad (26)$$

각 축의 서보밸브에 대한 제어법칙을 식 (27)과 같이 설정한다.⁽⁸⁾

$$\underline{u} = K_T^{-1} \{Y \hat{\underline{a}} - K_D \underline{s}\} \quad (27)$$

여기서 $K_D = \operatorname{diag}\{K_{D1}, K_{D2}\}$, $K_{Di} > 0$ ($i=1, 2$)이다. 식 (27)에서 $Y \hat{\underline{a}}$ 는 피드포워드(feedforward)항을 의미하며, $K_D \underline{s}$ 는 P.I.D.제어기와 유사한 피드백(feedback) 제어항이다. 또한 미지의 파라미터에 대한 적응법칙을 식 (28)과 같이 설정한다.⁽⁸⁾

$$\dot{\hat{\underline{a}}} = -\Gamma Y^T \underline{s} \quad (28)$$

식 (27), (28)을 식 (26)에 대입하면 식 (29)가 되고

$$\dot{V}(t) = \underline{s}^T (Y \hat{\underline{a}} - \underline{Y} \underline{a} - K_D \underline{s}) - \underline{s}^T Y \dot{\hat{\underline{a}}} \quad (29)$$

이를 정리하면 Lyapunov 함수 V 의 시간미분 \dot{V} 는 식 (30)과 같이 된다.

$$\dot{V} = -\underline{s}^T K_D \underline{s} \leq 0 \quad (30)$$

따라서 제어계에 대한 Lyapunov 함수 V 는 양의 한정이고, 그에 대한 시간미분 \dot{V} 는 음의 반한정이므로 제어계는 안정함을 알 수 있다. 또한 Barbalat의 보조정리에 의해 위의 적응제어기를 적용함으로써 식 (31)과 같이 궤적추종오차는 0으로 수렴함을 알 수 있다.⁽⁸⁾

$$\dot{V} \rightarrow 0 \Rightarrow \underline{s} \rightarrow 0 \text{ as } t \rightarrow \infty \quad (31)$$

Fig. 2에는 본 논문에서 적용한 제어기의 블록선도를 도시하였다.

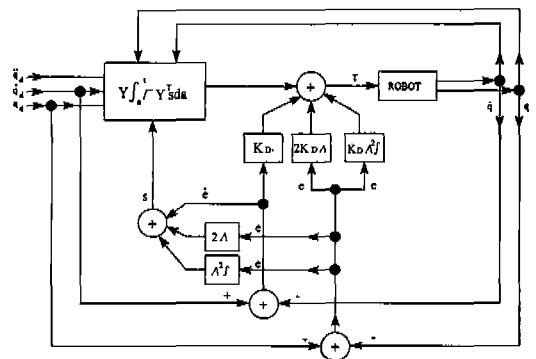


Fig. 2 Block Diagram of the Adaptive Controller

4. 실험결과 및 고찰

실험장치의 구성도를 Fig. 3에 나타내었다. 본 구동기는 수축력을 발생시킬 수 있으므로 2개의 구동기를 1조로 하여, 각각의 수축력이 서로 평형을 이루면서 풀리를 회전시키도록 한다. 1축과 2축의 구동기로 사용된 4개의 공압인공근육은 모두 첫 번째 링크에 고정되었다. 그러나 축의 회전력은 구동기에 연결된 타이밍 벨트(1축)와 와이어(2축)에 의하여 전달되며, 조작기는 구동기의 압력변화에 의해 압력이 높아진 구동기 방향으로 회전된다. 또한 조작기의 동작 중에 부하질량을 추가시키는 실험을 하기 위하여 2축 끝단에는 영구자석을 부착하였다. 각 관절 축에 직결된 로터리엔코더로 조작기의 회전각을 측정하였으며, 그 값은 카운터를 통해 PC에 입력시켰다. 회전각의 측정해상도는 7.85×10^{-4} radian이다.

PC에서 계산된 제어법칙(control law)을 12bit의 해상도를 가진 2개의 D/A변환기에 의해 아날로그 전압(0~5V)으로 변환시키고, 다시 이 전압지령을 1쌍의 서보밸브에 인가하였다. 서보밸브는 인가된 전압지령에 따라 각 구동기내의 공기압을 0~5 kgf/cm² 사이로 조절한다. 이때 사용된 Sampling Time은 0.5msec이다.

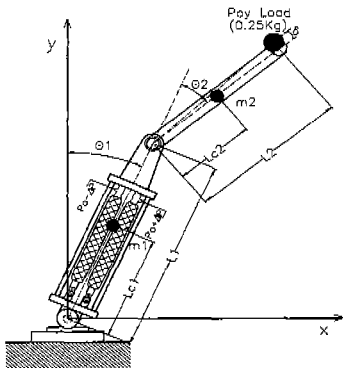


Fig. 3 Two-link Manipulator with Pneumatic Actuator

식 (11)과 같이 표현된 계의 모델에는 구동기의 히스테리시스를 비롯한 비선형성, 서보밸브의 동특성, 압축공기의 동특성 및 구동기와 서보밸브의 시간지연 등이 고려되지 않았기 때문에, 모델의 불확실성이 존재하게 된다. 이런 불확실성의 영향으로 적응제어기에 대한 계인 Γ, Λ 및 K_D 를 파라미터의 수렴성 및 제어 성능의 관점에서만 선정하면, 이들 모델의 불확실성의 영향으로 계의 안정성이 악화될 수 있다. 따라서 본 연구에서는 계의 안정성이

유지되면서 만족할 만한 파라미터의 수렴성 및 제어성능을 얻을 수 있도록, 실험을 통한 확인을 거쳐, 적응제어기에 대한 계인을 다음의 식 (32)와 같이 선정하였다.

$$\begin{aligned} \Lambda &= \text{diag}\{5.5 \ 5.5\} \\ K_D &= \text{diag}\{0.5 \ 0.2\} \\ \Gamma &= \text{diag}\{0.0001 \ 0.0001 \ 0.1 \ 0.1 \\ &\quad 2.3 \ 2.3 \ 1.0 \ 1.0 \ 0.1 \ 1.0 \ 0.1\} \end{aligned} \quad (32)$$

Fig. 4는 0.5Hz의 주기와 0.3rad의 진폭을 갖는 정현파를 기준궤적으로 한 경우의 결과로, 약 1초 후에 궤적 추종오차가 현격히 줄어들음을 알 수 있었다.

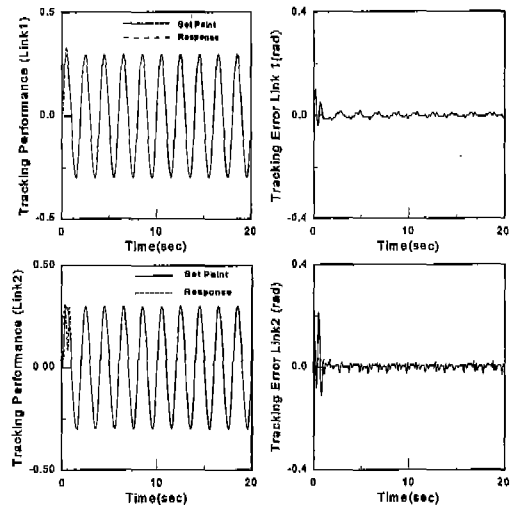


Fig. 4 Tracking of the sinusoidal trajectory.

Fig. 5는 파라미터의 변화에 대한 강인성을 조사하기 위하여 0.5Hz의 주기와 0.3rad의 진폭을 갖는 정현파를 기준으로 적응제어를 하는 과정에서, 동작 중간 약 5초 후에 2축의 끝단에 0.25kg의 부하질량을 추가시킨 경우의 결과이다. 그림에서 1축의 추종오차에는 거의 영향이 없으나, 2축에 대해서는 부하질량 추가 후 추종오차가 다소 증가하는 것을 볼 수 있다. 그러나 제어계의 안정성은 유지되고 있으며, 추종성능의 저하도 크지 않음을 확인할 수 있다.

관성모멘트에 관련된 파라미터인 \hat{a}_1, \hat{a}_2 및 위치에너지에 관련된 파라미터인 \hat{a}_5, \hat{a}_6 에 대하여, 부하질량의 변화가 없는 경우와 있는 경우의 파라미터 추정치의 변화

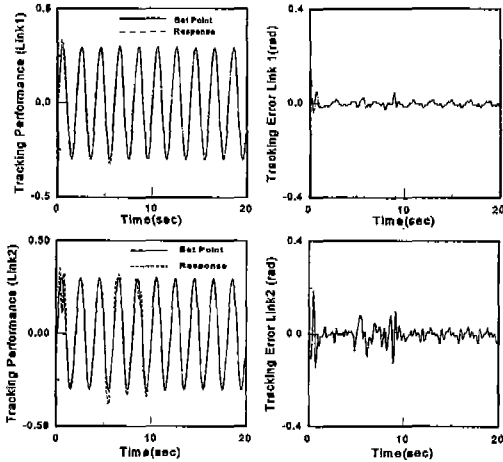


Fig. 5 Tracking with addition of 0.25kg pay-load

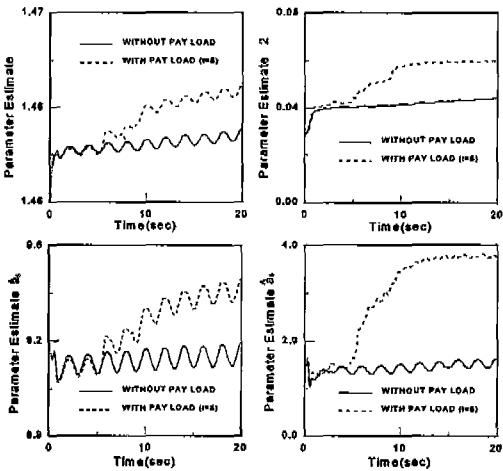


Fig. 6 Parameter estimates.

를 비교하여 Fig. 6에 나타내었다. 그림에서 약 5초 이후에 발생한 파라미터의 변화에 따라 파라미터 추정치가 변화하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 7은 정현파의 크기를 0.2 rad에서 0.4 rad 까지 변화시키며 실험을 행한 결과이며, 이때의 제어입력도 함께 도시하였다. Fig. 8에서는 정현파의 주기를 0.3Hz에서 0.5Hz까지 변화시키며 실험한 결과이다. 실험결과 페루프계는 어느 정도의 기준정현파의 진폭 및 주기의 변화에 대해서도 안정성을 유지하면서 제적추종성능을 유지함을 알 수 있었다.

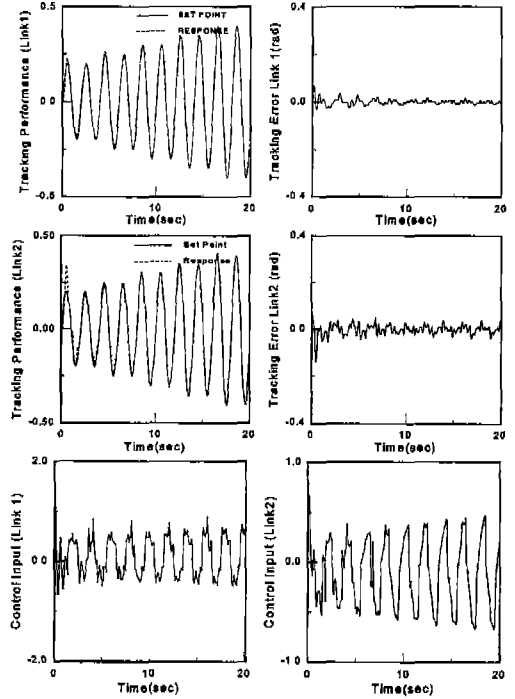


Fig. 7 Tracking of amplitude varying sinusoidal trajectory

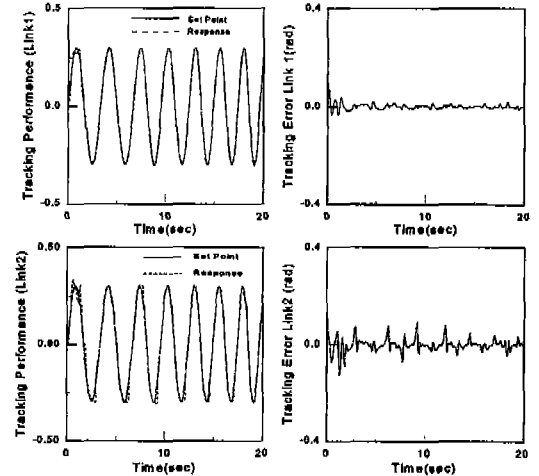


Fig. 8 Tracking of frequency varying sinusoidal trajectory (0.3Hz → 0.5Hz)

5. 결론

공압인공근육에 의해 구동되는 2관절 수직로봇에 대해

여, 서보밸브와 구동기에 관련된 선형화된 관계식을 얻고, 이를 2자유도 조작기의 비선형 동적 관계식에 연동시켜, 전체계의 비선형 모델을 설정하였다. 적응제어기를 설계하여, 비선형 모델의 불확실한 파라미터를 추정하고, 그 추정 값을 기본으로 회전각에 대한 추종제어를 행하였다. 또한 조작기 동작 중 끝단에 부하질량을 추가하거나, 목표회전각의 진폭 및 주기를 변화시키는 실험을 행하여, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 공압인공근육을 이용한 수직회전조작기의 위치제어에 대한 모델링 기법, 적응제어이론의 응용기법의 타당성을 입증하였다.

(2) 구동기 및 공압서보밸브의 동특성으로 인한 제약에도 불구하고 제안된 적응제어기를 적용하여, 2자유도 조작기의 회전각에 대한 만족할 만한 저주파 궤적 추종제어 성능을 얻을 수 있었다.

(3) 부하질량의 변동에 의한 파라미터의 변화, 목표회전각의 변화에 대해서도, 계의 안정성을 유지할 수 있었으며, 궤적추종제어성능의 저하도 크지 않았다.

참고 문헌

1. Chou, C. P., and Hannaford, B., "Measurement and Modeling of McKibben Pneumatic Artificial Muscles," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 12, No. 1, pp. 90-102, 1996.
2. Norotsugu, T., and Wada, T., Application of Artificial Rubber Muscle to Robot Control, *J. of the Robotics Society of Japan*, Vol. 9, No. 4, pp. 502-506, 1991.
3. Kagawa, T., Fujita, T., Yamanaka, T., Kadan, T., and Kimura, T., Power Assist Cir-

- cuit using Artificial Muscle, *Trans. JSME, Series C*, Vol. 59, No. 564, pp. 2376-2382, 1993.
4. Ando, O., Noritsugu, T., Takaiwa, M., and Yamanaka, T., "Application of Rubber Artificial Muscle Manipulator to Rehabilitation Aided Robot," *Proc. Conf. Robotics Society of Japan '93*, pp. 993-996, 1993.
5. Jin, S., Watanabe, K., and Nakamura, M., Trajectory Tracking Controls for a Two-Link Manipulator with Artificial Rubber Muscles, *Trans. JSME, Series C*, Vol. 59, No. 565, pp. 2745-2752, 1993.
6. Osuka, K., Kimura, T., and Ono, T., H_{∞} Control of Rubbertuator, *Proc. Conf. Robotics-Mechatronics '90 (in Japanese)*, 900-30, pp. 167-170, 1990.
7. McDonell, B. W., and Bobrow, J. E., "Adaptive Tracking Control of an Air Powered Robot Actuator," *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 115, pp. 427-433, 1993.
8. Slotine, J.-J. E., and Li, W., *Applied Non-linear Control*, Prentice-Hall, 1991.
9. Lewis, F. L., Abdallah, C. T., Dawson, D. M., *Control of Robot Manipulators*, Macmillan, 1993.
10. Bridgestone Corp., *The Rubbertuator Product Literature*, 1987.
11. Asada, H. and Slotine, J.-J. E., *Robot Analysis and Control*, A Wiley-Interscience Publication, 1986.