

인공 고무 근육을 이용한 로봇 매니퓰레이터의 선형 궤도 추적 제어

陳 相浩⁰, 渡邊桂吾, 中村政俊, 李 錫圭*

佐賀大學校, 嶺南大學校*

Trajectory Tracking Controls for A Robot Manipulator with Artificial Muscles

Sang-ho Jin⁰, Keigo Watanabe, Masatoshi Nakamura, Suck-gyu Lee*

Saga University, Yeungnam University*

Abstract - Trajectory tracking control problems are described for a two-link robot manipulator with artificial rubber muscle actuators. 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 time-lag by the step response. Two control laws such as the feedforward and the computed torque control methods, are experimentally applied for controlling the circular trajectory of an actual robot manipulator.

1. 서론

전동기 및 유압모터를 이용한 산업용 로봇은 인간에 비해 토오크가 너무크며, 유연성이 약한 단점이 있다. 또한 도장용 로봇 등에서는 스파크에 의해 유기용제에 인화되어, 폭발하는 위험성이 있기 때문에 스파크가 없는 액추에이터를 사용한 로봇의 팔의 개발이 필요하다. 최근에는 이와같은 문제점을 개선하기 위한 액추에이터로 생체 근육에 가까운 특성을 가진 'rubbertuator'라 불리는 공기압 구동형 고무근육이 개발되었다. (1)-(3) 그러나 이 고무 인공 근육을 이용한 로봇 매니퓰레이터는 히스테리시스 및 비선형 특성이 강하며, 또 공기의 압축성 때문에 응답지연이 생기는 등의 문제점이 있어서 제어하기 어려운 시스템으로 생각되어 지고있다.

본 논문은 인공 고무 근육을 이용한 2 자유도 로봇 매니퓰레이터의 궤도추적제어에 관해서, 모델에 근거한 선형제어가 어느정도 가능한가를 조사 연구하였다. 어떤 특정 동작점에서의 각링크의 선형모델을 추정하여, 이 모델을 이용하여 피드포워드 제어기와 토오크 연산제어기를 설계하였다. 이와같은 제어기를 적용한 제어기를 제작 실험하여 양 제어법을 비교, 검토하고 구조상의 문제점 등에 대하여 고찰하였다.

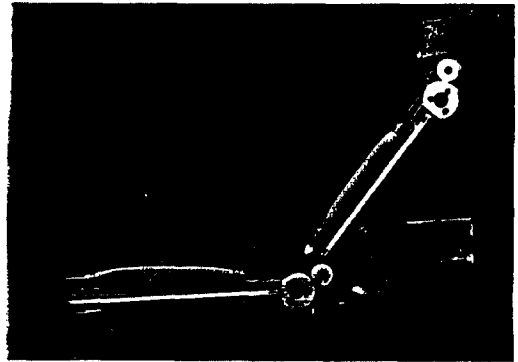


그림 1 a) 인공 고무 근육을 가진 매니퓰레이터



그림 1 b) 실험 장치

2. 제어대상의 구조

본연구의 실험에 사용된 인공 고무 근육(bridgestone사 제품, RUB-825, RUB-420)의 2 링크 매니퓰레이터의 모양은 그림 1 a)에 나타나있다. 제어기로 사용되는 개인용 컴퓨터는 PC-9801 DS(16 MHz, 수치연산 coprocessor 부착)를 사용하였다. 컴퓨터에서 계산된 출력전압은 D/A변환기를 사용하여 아날로그 량으로 변환시키고, V/A 변환기에 입력되어진다. 전류로 변환된 조작신호(4 - 20 mA)는 서보 밸브에 입력되어져, 공기량을 제

어하는 전자제어기를 동작시켜, rubbertuator 내의 압력(0 - 6 Kgf/cm²)을 변화시킴으로써 매니퓰레이터 구동 토오크를 발생시킨다.(그림 2) 매니퓰레이터는 수평방향으로만 움직이도록 설계되어 있어 중력에는 영향을 받지않는다. 또한 각 매니퓰레이터의 관절각 검출은 각관절에 붙어있는 회전식 엔코더(2000 P/K)으로 검출하여, 카운터를 통하여 컴퓨터에 입력되어진다. 그림 3은 전체 시스템의 개략도이다.

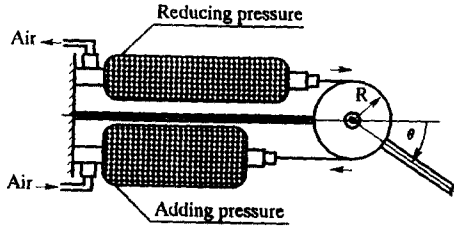


그림 2 고무 액츄에이터의 구조

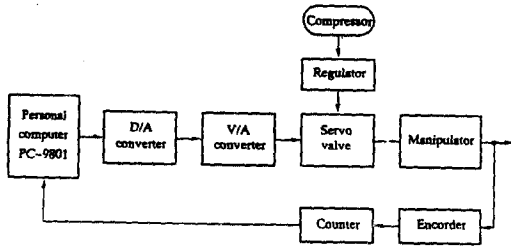


그림 3 매니퓰레이터 시스템의 개략도

3. 과도 응답 측정과 모델링

3.1 과도응답 측정

컴퓨터에서 계산되어진 매니퓰레이터에 대한 제어정보는 2절에서 설명한 것처럼 D/A 변환기 및 V/A 변환기를 통하여 서보밸브단에 의해서 공기압으로 변환된다. 따라서 2 종류의 변환기를 통한 후 컴퓨터로부터의 지정전압이 서보밸브단의 도착시점에 어느 정도의 전압강하가 일어날까를 조사할 필요가 있다. 링크 1,2에 각 초기전압을 2.2 V, 2.4 V로 인가한다. 한 예로 0.5 V의 스텝형의 입력 전압을 인가한 경우, 컴퓨터로부터의 제어 입력전압(set voltage), D/A 변환기에서의 출력전압(D/A voltage), 및 서보밸브단의 모니터 출력전압(servo voltage)의 측정 결과를 그림 4에 나타내었다. 그 결과로부터 링크1, 2의 서보밸브단까지의 전압강하는 각각 약 0.06 V와 0.12 V임을 알았다. 또한 그와같은 전압강하에 있어서, 링크 1의 것이 링크 2의 것에 비하여 settling 시간이 길다. 그 원인은 링크 1에 사용된 rubbertuator가 링크 2에 사용된 것에 비하여 50 mm 길고, 직경이 3 mm 크기 때문이다. 그림 5는 매니퓰레이터의 간략한 모델을 나타내고있다. 링크 1, 2의 길이는 각각 385 mm, 110 mm이다. 구동 범위는 관절각 θ_1 에 대해서는 약 137 deg, θ_2 에 대해서는 약 101 deg이다. 초기(기준) 전압값을 θ_1, θ_2 모두 0 라디가 되게 2.2 V 및 2.4 V로 설정하며, 초기전압

값에서 0.1 V 씩의 간격으로 전압을 증가시키고, 최대 동작 범위인 4.1 V 및 4.5 V 까지 매니퓰레이터를 반시계방향으로 회전시키고, 그후 똑같이 전압을 감소시키며 시계방향으로 회전시키는 경우의 관절각 θ_1, θ_2 의 측정 결과가 그림 6에 나타나 있다. 이 그림에서 양 링크는 히스테리시스 특성을 가지고 있지만, 동작 범위의 최대부분을 제외하면 한쪽방향의 입력 전압과 출력의 관절각은 대략 선형인 것을 알수 있다.

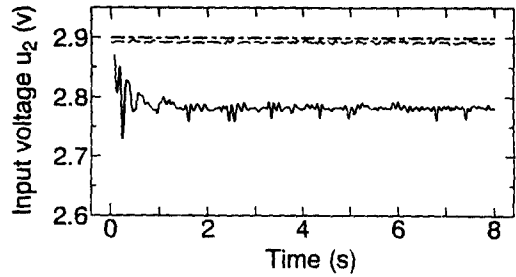
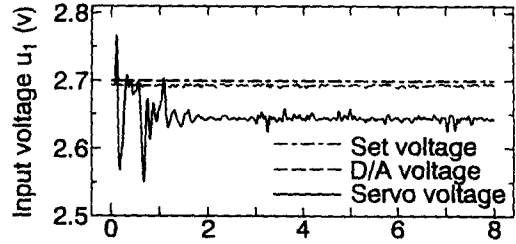


그림 4 전압 강하의 측정

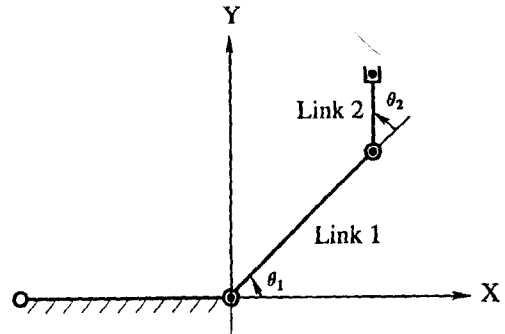


그림 5 2 관절 매니퓰레이터의 모델

스텝형의 제어 신호를 가하여, 거기에 대한 과도응답을 조사하였다. 위와 같이 초기전압 범위 내에서 양 관절에 일정 회전각도에 대응 하는 제어 전압을 동시에 준다. 입력전압값에 있어서는 0.1 - 1.0 V의 범위에서 0.1 V간격마다 크게 변화한 것을 이용하여, 실제의 관절각 θ_1, θ_2 의 출력을 샘플링 시간 40 ms로 기록한것이 그림 7에 나타나있다. 일정전압의 크기를 따라 양 링크 출력 각도는 2 차례의 응답을 나타내며, 특히 링크 1에 대하여는 조작 지연 시간이 보였다.

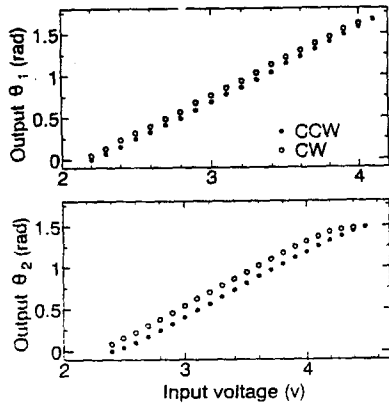


그림 6 매니퓰레이터의 입출력 관계

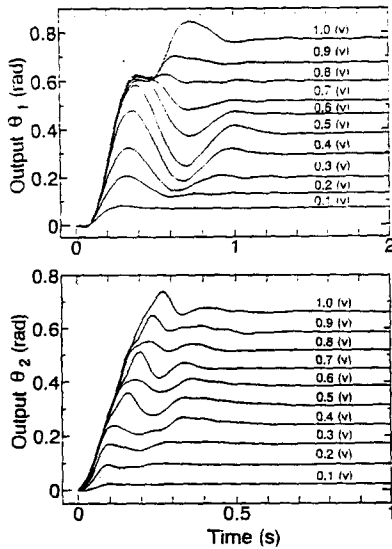


그림 7 스텝 응답

3.2 매니퓰레이터의 모델링

여기서 제어 대상을 2 차 선형계의 진동 모델이라고 가정하였다. 독립 관절 제어법을 적용하고, 제어입력의 지연시간을 고려했을 때 그 선형 모델은

$$\ddot{\theta}_i(t) + 2\zeta_i\omega_{ni}\dot{\theta}_i(t) + \omega_{ni}^2\theta_i(t) = \frac{1}{I_i}\mu_i(t - d_i) \quad (1)$$

로 나타낼 수 있다. 여기서 θ_i 는 링크 i 의 관절각, ζ_i 는 링크 i 의 감쇄비, ω_{ni} 는 고유 진동수, I_i 는 링크 i 의 관성 모멘트, μ_i 는 링크 i 의 구동 토크, d_i 는 지연시간이다. 파라메타를 정리하여 다시쓰면, 식 (1)을

$$\ddot{\theta}_i(t) + a_i\dot{\theta}_i(t) + b_i\theta_i(t) = c_i\mu_i(t - d_i) \quad (2)$$

와 같이 쓸 수 있다. 단 이 경우 μ_i 는 링크 i 의 구동 입력 전압이다. 그림 7의 스텝응답의 파형에서 위의 선형 모델을 유도하기 위해서, 입력 전압을 0.5 V로 하여 인가한 때의 응답으로부터 식 (2)의 파라메타의 값을 다음과 같이 결정했다.

$$\begin{aligned} a_1 &= 4.12 \text{ (1/s)}, & b_1 &= 108.16 \text{ (1/s}^2\text{)} \\ c_1 &= 82.77 \text{ (rad/vs}^2\text{)}, & d_1 &= 80 \text{ (ms)} \quad (3) \\ a_2 &= 22.68 \text{ (1/s)}, & b_2 &= 441 \text{ (1/s}^2\text{)} \\ c_2 &= 279.31 \text{ (rad/vs}^2\text{)}, & d_2 &= 0 \text{ (ms)} \quad (4) \end{aligned}$$

이상에서 구한 파라메타를 이용한 경우의 관절각도의 출력응답을 그림 (8)에 나타내었다. 실제 스텝 응답과 비교하기 위하여 식 (3)과 (4)의 파라메타는 스텝 응답의 초기상승부분에 중점을 두어 근사화한 것이다.

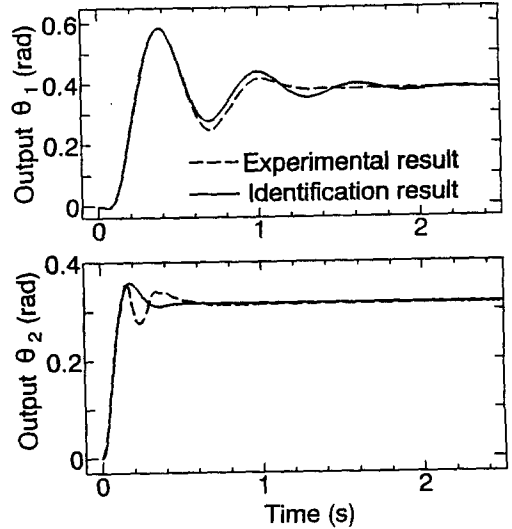


그림 8 추정모델에 대한 스텝 응답

4. 제어기 설계

4.1 피이드 포워드 제어기

피이드 포워드 제어는 목표각도, 각속도, 각가속도에 근거하여, 플랜트의 역동역학 모델로부터 역추예터의 출력을 예측한다. 실제 플랜트의 입력 $\mu_i(t)$ 는 부귀환된 각도와 각속도의 관절 독립의 PD형 제어기와 정제환 출력의 합으로 결정된다. (7)

$$\begin{aligned} \mu_i(t) = \frac{1}{c_i} & \{ K_{iv} e_i(t) + K_{ip} e_i(t) + \dot{\theta}_{id}(t) \\ & + a_i \theta_{id}(t) + b_i \theta_{id}(t) \} \quad (5) \end{aligned}$$

여기서 θ_{id} 는 관절 i 의 목표각도, $\dot{\theta}_i$ 를 관절 i 의 출력 각도라면, 출력오차 $e_i(t)$ 는

$$e_i(t) = \theta_{id}(t) - \theta_i(t) \quad (6)$$

가 되며, K_{ip} 는 비례이득, K_{iv} 는 미분이득으로 한다. 또한 적분항을 추가하여 다시

$$\mu_i(t) \approx \mu_i(t) + K_{ii} \int e(t) dt \quad (7)$$

의 입력으로 정의한다. 여기서 K_{ii} 는 적분이득이다.

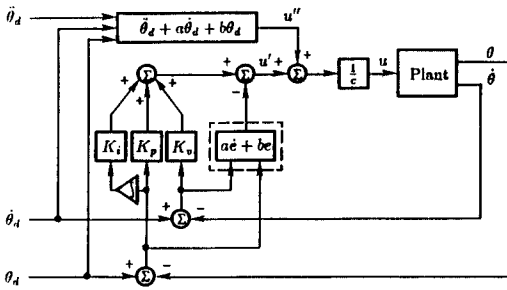


그림 9 PID 형 토크 연산제어 시스템의 개략도

4.2 토크 연산 제어기

토크 연산 제어에는 플랜트의 위치, 속도를 이용하여, 역동역학 모델에 따라 플랜트의 입력 토크를 계산한다. 단, 각가속도에 대해서는 목표각가속도에 더해서 각도와 각가속도의 각각의 관절 독립의 PD형 제어입력값도 포함한다. 즉 I 형 동작을 포함하지않은 제어 입력은

$$\mu_i(t) = \frac{1}{c_i} \{K_{iv} \dot{e}_i(t) + K_{ip} e_i(t) + \dot{\theta}_{id}(t) + a_i \dot{\theta}_i(t) + b_i \theta_i(t)\} \quad (8)$$

가 된다. (7)(8) 그러나, 식 (8)의 표현은 식(5)의 정제환 제어기의 응답이 명확하지 않기 때문에, 여기서는

$$\mu_i(t) = \frac{1}{c_i} \{K_{iv} \dot{e}_i(t) + K_{ip} e_i(t) + \dot{\theta}_{id}(t) + a_i \dot{\theta}_{id}(t) + b_i \theta_{id}(t) - [a_i e_i(t) + b_i e_i(t)]\} \quad (8')$$

와 같은 등가표현을 이용한다. 그림 (9)에서는 토크 산출제어법을 이용한 경우의 임의의 링크에 대한 제어 시스템의 개략도이다. 여기서, 파선 부분의 블럭을 제외하면 피이드 포워드 제어축이 된다.

5. 실험결과

이상의 제어기를 이용하여 실제의 고무 인공근육을 사용한 2 링크 매니퓰레이터로 원궤적을 추적하는 제어실험을 하였다. 샘플링 폭은 40 ms 로 하였으며, 공기압력은 6 kgf/cm² 이다. 초기조건은 $\theta_1 = 0.772$ rad, $\theta_2 = 0.562$ rad, $\dot{\theta}_1 = \dot{\theta}_2 = 0$ 로 하였다. 반경은 30 mm의 원궤적을 추종하는 실험을하기 위해 작업좌표계에서의 궤도는

$$x(t) = 30 \cos(\pi t/5) + 290 \quad (9)$$

$$y(t) = 30 \sin(\pi t/5) + 360 \quad (10)$$

로 하였다. 단, 궤도 주기는 10 초이다. 관절 좌표계에서의 목표각도 $\theta_d(t) = [\theta_{1d}(t), \theta_{2d}(t)]^T$ 는

$$\theta_{1d}(t) = \text{atan2}(y, x) - \text{atan2}(k, x^2 + y^2 + l_1^2 - l_2^2) \quad (11)$$

$$\theta_{2d}(t) = \text{atan2}(k, x^2 + y^2 + l_1^2 - l_2^2) \quad (12)$$

$$k = \{(x^2 + y^2 + l_1^2 + l_2^2)^2 - 2[(x^2 + y^2)^2 + l_1^4 - l_2^4]\}^{1/2} \quad (13)$$

이다. 목표 각속도는 $\dot{\theta}_d(t) = [\dot{\theta}_{1d}(t), \dot{\theta}_{2d}(t)]^T = 0$ 이다. 그림 10은 PID 형 피이드 포워드 제어기를 이용한 경우의 결과를 나타내고있다. 또한 PID형의 토크 연산제어기를 이용한 경우의 실험결과를 그림 11에 나타내었다. 각각의 부궤환이득은 표 1과 같이 설정하였다. 그림으로부터 토크 연산제어법에서는 피이드 포워드 제어법에 비하여 진동이 심하였지만, 과도시의 overshoot도 적고 전반적으로 추종오차는 작았다.

	Link	$K_{ip}(1/s^2)$	$K_{iv}(1/s)$	$K_{ii}(1/s^3)$
Fig. 10	Link 1	100	5	250
	Link 2	20	5	250
Fig. 11	Link 1	230	8	450
	Link 2	600	15	400

표 1 피이드 포워드 및 토크 연산 제어에서의 제어 이득

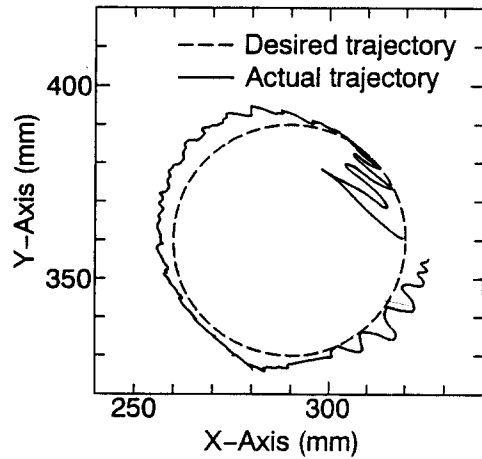


그림 10 피이드 포워드 제어법을 이용한 원궤적 추적결과

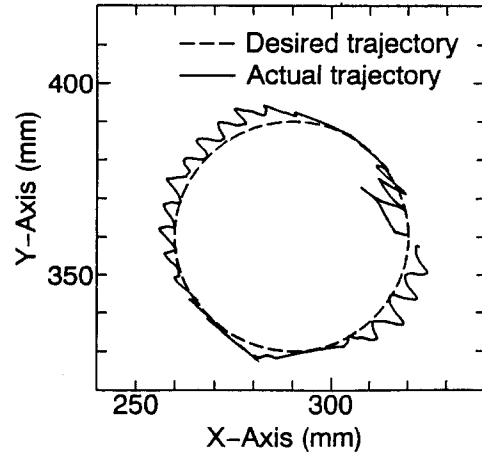


그림 11 토크 연산 제어법을 이용한 원궤적 추적결과

6. 결론

고무 근육을 이용한 2 링크 로봇 매니퓰레이터의 원래적 추종제어에 대한, 선형 피이드 포워드 제어와 토오크 연산제어의 2 종류의 제어법칙을 실험적으로 적용하였다. 진동기를 이용한 매니퓰레이터의 비선형 모델을 이용한 sliding 모드 제어 등⁽⁴⁾과 비교하여 보면, 제어 상태가 그다지 좋지않았으며, 피이드 포워드 제어보다는 토오크 연산 제어법을 전체적인 오차가 줄어드는 것을 알 수있다. 보다 더 정확한 제어를 위해서는 비선형 모델을 근거로 한 비선형 제어가 바람직하다.

참고문헌

1. 土方正志, Trigger, Vol. 11, No. 2, pp. 97 - 101, 1992.
2. 則次, 和田, 日本 ロボット學會誌, Vol. 9, No. 4, pp. 502 - 506, 1991.
3. 山藤和男, 日本 ロボット學會誌, Vol. 9, No. 4, pp. 498 - 501, 1991.
4. 大須賀公一, 計測 自動制御 學會 論文集, Vol. 30, No., 8, pp. 681 - 687, 1991.
5. F. Miyazaki et al., Lecture Notes in Control and Information Sciences, Vol. 139, Springer-Verlag, pp. 84 - 99, 1989.
6. 大須賀, 木村, 小野, ロボティクス・メカトロニクス 講演會 '90 講演 論文集, Vol. A, 900 - 30, pp. 167 - 170, 1990.
7. C.H.An, C.G.Atkeson and J.M.Hollerbach, Model-Based Control of a Robot Manipulator, The MIT Press, 1988.
8. J.J.Craig, Introduction to Robotics, Mechanics and Control, Addison and Weseley Co., 1986.