

인공 고무 근육을 이용한 로봇 매니퓰레이터의 궤도 추적 제어

論文
43~3~16

Trajectory Tracking Control for a Robot Manipulator with Artificial Muscles

陳 相 浩*·渡邊桂吾**·中村政俊***·李 錫 圭§
(Sang-Ho Jin·Keigo Watanabe·Masatosi Nakamura·Suck-Gyu Lee)

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.

Key Words : Artificial Muscle Actuator, Trajectory Tracking, Independent Joint Control, Computed Torque Control

1. 서 론

전동기 및 유압모터를 이용한 산업용 로봇은 경우에 따라 토오크가 너무 크며, 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 이와 같은 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 지고 있다[5,6]. 1985년 Bridgestone사가 인공 고무근육을 개발한 후, 연구 목적에 맞는 여러가지 제어가 설계되어져 왔다. 이러한 비선형 특성이 강한 제어 대상을 선형 제어법으로 제어를 하게 되면 오차가 생기지만 제어 입력의 연산 계산시간이 비선형제어법보다 빠르고 소프트웨어의 비중을 줄일수 있는 장점이 있다.

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

2. 제어대상의 구조

본 연구의 실험에 사용된 인공 고무 근육(Bridgestone사 제품, RUB-825 RUB-420)의 2 링크 매니퓰레이터의 모양은 그림 1a)에 나타나

*正 會 員 : 佐賀大學 生産機械工學科 助教授·工博

**非 會 員 : 佐賀大學 生産機械工學科 副教授·工博

***非 會 員 : 佐賀大學 電氣工學科 教授·工博

§正 會 員 : 嶺南大 工大 電氣工學科 副教授·工博

接受日字 : 1993年 2月 9日

1 次修正 : 1993年 5月 22日

2 次修正 : 1993年 8月 12日

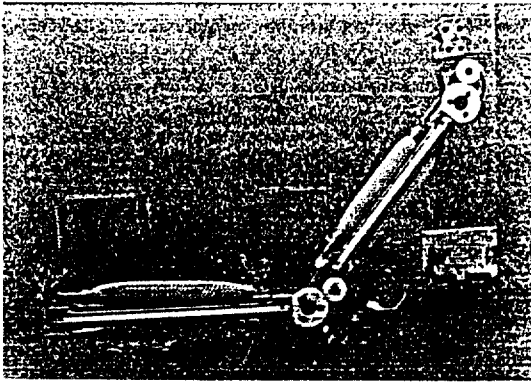


그림 1 a) 인공 고무 근육을 가진 매니퓰레이터
Fig. 1 a) Manipulator with artificial rubber muscles

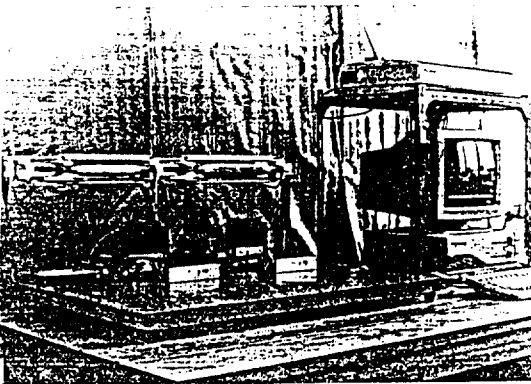


그림 1 b) 실험장치
Fig. 1 b) Experimental apparatus

있다. 제어기로 사용되는 개인용 컴퓨터는 PC-9801 DS(16MHZ, 수치연산 coprocessor부착)를 사용하였다. 컴퓨터에서 계산된 출력전압은 D/A 변환기를 사용하여 아날로그 량으로 변환시키고, V/A 변환기에 입력 되어진다. 전류로 변환된 조작신호(4-20mA)는 서보 밸브에 입력되어져, 공기량을 제어하는 전자제어기를 동작시켜, rubbertuator내의 압력(0-6kgf/cm²)을 변화시킴으로써 매니퓰레이터 구동 토크를 발생시킨다. (그림 2) 매니퓰레이터는 수평방향으로만 움직이도록 설계되어 있어 중력에는 영향을 받지 않는다. 또한 각 매니퓰레이터의 관절 각 검출은 각 관절에 붙어있는 회전식 엔코더(2000P/K)으로 검출하여, 카운터를 통하여 컴퓨터에 입력되어진다. 그림 3은 전체 시스템의 개략도이다.

인공고무근육의 구조는 그림 2에서 보는 것 같이 2개가 1조로 되어 사용하며 양단이 금속으로 되어 있으며 특수 고무튜브 위에 균등한 동작을 하기 위해 섬유질 끈으로 감싸져 있다. 작동은 인간의 근육 운동과 비슷하며, 내부에서 가압을 하므로 축과 직각 방향으로 팽창하며 축 방향으로 수축하여 토크를 발생한다. 감압을 하면 가압의 동작과 반대 작용을 한다. 또한 타액츄에이터 보다 경량이며, 고토오크를 발생하며 모터에 비해 감속기가 없으므로 저마찰이며 그 구조가 간단한 특성이 있다.

3. 과도 응답 측정과 모델링

3.1 과도응답 측정

컴퓨터에서 계산되어진 매니퓰레이터에 대한 제어정보는 2절에서 설명한 것처럼 D/A변환기 및 V/A변환기를 통하여 서보 밸브단에 의해서 공기압으로 변환된다. 따라서 2종류의 변환기를 통한 후 컴퓨터로부터의 지령전압이 서보밸브단의 도착시점에 어느 정도의 전압강하가 일어날

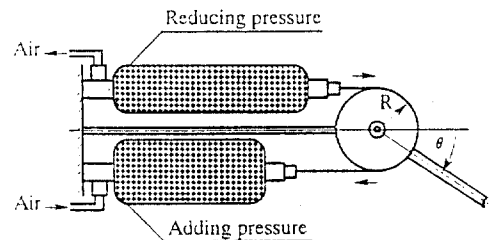


그림 2 고무 액츄에이터의 구조
Fig. 2 Rubbertuator mechanism

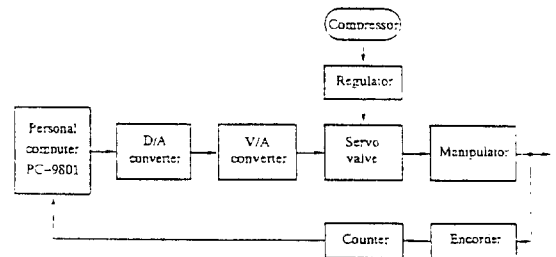


그림 3 매니퓰레이터 시스템의 개략도
Fig. 3 Block diagram of manipulator system

까를 조사할 필요가 있다. 링크 1,2에 각 초기전압을 2.2V, 2.4V로 인가한다. 한 예로 0.5V의 스텝형의 입력 전압을 인가한 경우, 컴퓨터로부터의 제어 입력전압(set voltage), D/A변환기에서의 출력전압(D/A voltage), 및 서보밸브단의 모니터 출력전압(servo voltage)의 측정 결과를 그림 4에 나타내었다. 그 결과로부터 링크1,2의 서보밸브단까지의 전압강하는 각각 약 0.06V와 0.12V임을 알았다. 또한 그와 같은 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 3mm 크기 때문이다. 그림 5는 매니퓰레이터의 간략한 모델을 나타내고 있다. 링크 1, 2의 길이는 각각 385mm, 110mm이다. 구동 범위는 관절각 θ_1 에 대해서는 약 137deg, θ_2 에 대해서는 약 101deg이다. 초기(기준) 전압값을 θ_1, θ_2 모두 0 rad이 되게 2.2V 및 2.4V로 설정하며, 초기전압값에서 0.1V씩의 간격으로 전압을 증가시키고, 최대 동작 범위인 4.1V 및 4.5V까지 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 입

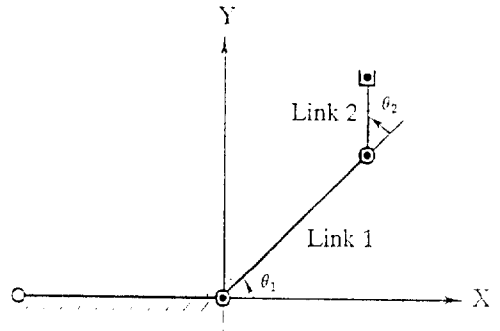


그림 5 관절 매니퓰레이터의 모델
Fig. 5 Model of two-link manipulator

력 전압과 출력의 관절각은 대략 선형인 것을 알 수 있다.

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

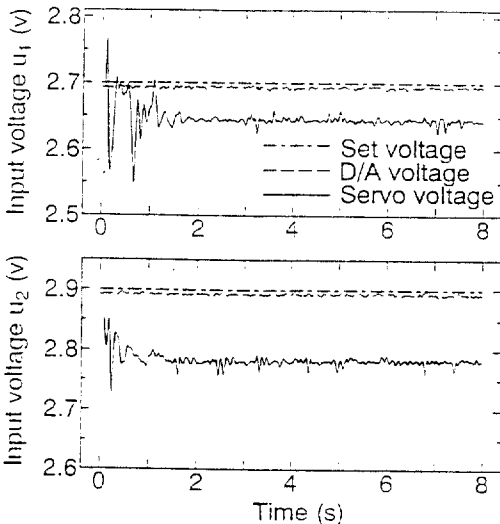


그림 4 전압 강하의 측정
Fig. 4 Measurements of voltage drop

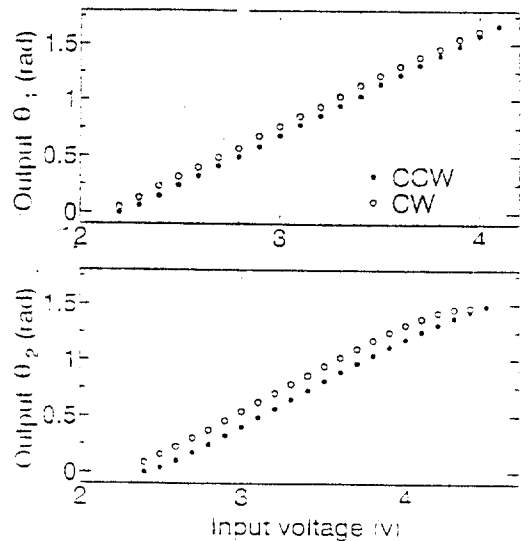


그림 6 매니퓰레이터의 입출력 관계
Fig. 6 Input-output relations of manipulator

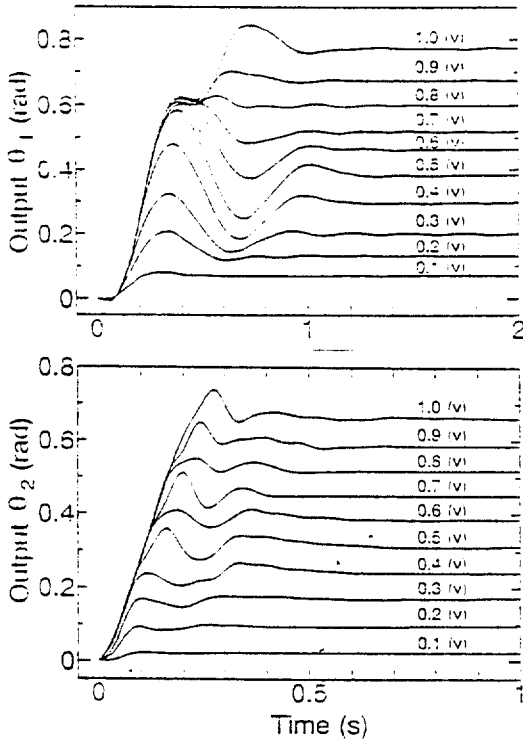


그림 7 스텝 응답
Fig. 7 Step response

3.2 매니퓰레이터의 모델링

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

$$\theta_i(t) + 2\zeta_i\omega_n\theta_i(t) + \omega_n^2\theta_i(t) = \frac{1}{I_i}\mu_i(t-d_i) \quad (1)$$

로 나타낼 수 있다. 여기서 θ_i 는 i 의 관절각, I_i 는 링크 i 의 감쇄비, ω_n 는 고유 진동수, I_i 는 링크 i 의 관성 모멘트, μ_i 는 링크 i 의 구동 토크, d_i 는 지연시간 이다. 파라메타를 정리하여 다시 쓰면, 식 (1)을

$$\theta_i(t) + a_i \theta_m(t) + b_i\theta_i(t) = c_i\mu_i(t-d_i) \quad (2)$$

와 같이 쓸수 있다. 단 이 경우 μ_i 는 링크 i 의 구동 입력 전압이다. 그림 7의 스텝응답의 파형

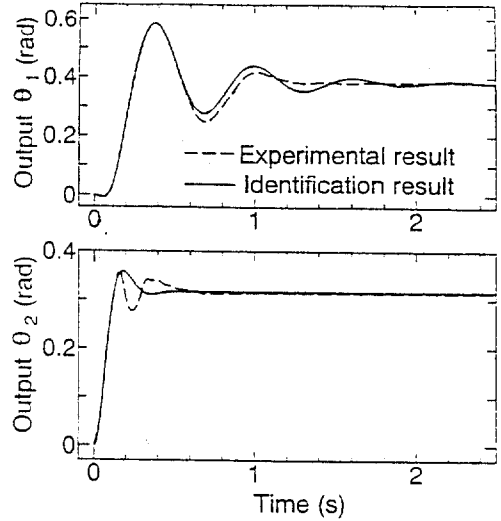


그림 8 추정모델에 대한 스텝 응답
Fig. 8 Step responses for the identified model

에서 위의 선형 모델을 유도하기 위해서, 입력 전압을 0.5V로 하여 인가한 때의 응답으로부터 식 (2)의 파라메터의 값을 다음과 같이 결정했다.

$$a_1 = 4.12(1/s), \quad b_1 = 108.16(1/s^2) \quad (3)$$

$$c_1 = 82.77(rad/vs^2), \quad d_1 = 80(ms)$$

$$a_2 = 22.68(1/s), \quad b_2 = 441(1/s^2) \quad (4)$$

$$c_2 = 279.31(rad/vs^2), \quad d_2 = 0(ms)$$

이상에서 구한 파라메터를 이용한 경우의 관절 각도의 출력응답을 그림 (8)에 나타내었다. 실제 스텝 응답과 비교하기 위하여 식 (3)과 (4)의 파라메터는 스텝 응답의 초기 상승부분에 중점을 두어 근사화한 것이다.

4. 제어기 설계

그림 7의 과도 응답 측정에서 처럼 링크 1에는 약 80ms의 시간 지연이 있으며, 링크 2에는 시간 지연이 없다. 따라서 제어입력에 시간 지연이 고려되어 모델화 되어졌으며 시뮬레이션에서 샘플링 폭을 40ms로 설정되었으므로 제어입력에 80ms의 시간지연이 고려되어 이득이 구하여 졌다.

4.1 피이드 포워드 제어기

피이드 포워드 제어는 목표각도, 각속도, 각가속도에 근거하여, 플랜트의 역동역학 모델로부터 액츄에이터의 출력을 예측한다. 실제 플랜트의 입력 $\mu_i(t)$ 는 부재화된 각도와 각속도의 관절 독립의 PD형 제어기와 피이드 포워드 출력의 합으로 결정 된다[7].

$$\mu_i(t) = \frac{1}{C_i} \left\{ K_{i\dot{\theta}} \dot{\theta}_i(t) + K_{i\ddot{\theta}} \ddot{\theta}_i(t) + \theta_{id}(t) + a_i \theta_i(t) + b_i \dot{\theta}_i(t) \right\} \quad (5)$$

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

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

가되며, $K_{i\dot{\theta}}$ 는 비례이득, $K_{i\ddot{\theta}}$ 는 미분이득으로 한다. 또한 적분항을 추가하여 다시

$$\mu_i(t) = \mu_i(t) + K_{ii} \int_0^t e_i(t) dt \quad (7)$$

의 입력으로 정의한다. 여기서 K_{ii} 는 적분이득이다.

4.2 토오크 연산 제어기

토오크 연산 제어에는 플랜트의 위치, 속도를 이용하여, 역동역학 모델에 따라 플랜트의 입력 토오크를 계산한다. 단, 각가속도에 대해서는 목표 각가속도에 대해서 각도와 각가속도의 각각

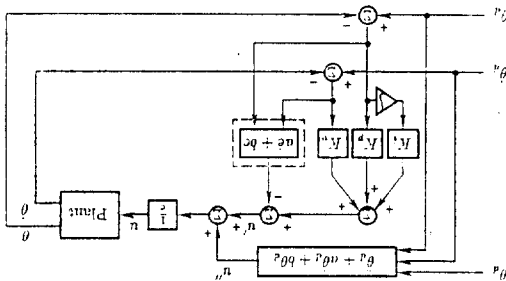


그림 9 PID형 토오크 연산제어 시스템의 개략도.
Fig. 9 Block diagram of a PID-type computed torque control system

의 관절 독립의 PD형 제어 입력값도 포함한다. 즉 I형 동작을 포함하지 않은 제어 입력은

$$\mu_i(t) = \frac{1}{C_i} \{ K_{i\dot{\theta}} \dot{\theta}_i(t) + K_{i\ddot{\theta}} \ddot{\theta}_i(t) + \theta_i(t) + a_i \theta_i(t) + b_i \dot{\theta}_i(t) \} \quad (8)$$

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

$$\mu_i(t) = \frac{1}{C_i} \left\{ K_{i\dot{\theta}} \dot{\theta}_i(t) + K_{i\ddot{\theta}} \ddot{\theta}_i(t) + \theta_{id}(t) + a_i \theta_{id}(t) + b_i \dot{\theta}_{id}(t) - [a_i e_i(t) + b_i \dot{e}_i(t)] \right\} \quad (8)'$$

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

5. 실험결과

이상의 제어기를 이용하여 실제의 고무 인공 근육을 사용한 2 링크 매니퓰레이터로 원계적을 추적하는 제어실험을 하였다. 샘플링 폭은 40ms로 하였으며, 공기압력은 6kmf/cm² 이다. 초기조건은 $\theta_1 = 0.772rad$, $\theta_2 = 0.562rad$, $\dot{\theta}_1 = \dot{\theta}_2 = 0$ 로 하였다. 반경은 30mm의 원계적을 추종하는 실험을 하기위해 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 10초이다. 관절 좌표계에서의 목표각도 $\theta_d(t) = [\theta_{1d}(t), \theta_{2d}(t)]^T$ 는

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

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

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

이다. 단 여기서 l_1 과 l_2 는 각각 385mm 와 110

표 1 피이드 포워드 제어 및 토오크 연산 제어에서의 제어 이득

Table 1 Control gains of feedforward control and computed torque control

	Link	$K_{1D}(1/s^2)$	$K_{1V}(1/s)$	$K_{1I}(1/s^3)$
Fig.10	Link 1	130	1.2	700
	Link 2	530	15	650
Fig. 11	Link 1	270	4.3	530
	Link 2	1000	12	700

mm 이다. 목표 가속도는 $\theta_d(t)=[\theta_{1d}(t), \theta_{2d}(t)]^T$ 이다. 그림 10은 PID형 피이드 포워드 제어를 이용한 경우의 결과를 나타내고 있다. 또한 PID형의 토오크 연산제어를 이용한 경우의 실험 결과를 그림 11에 나타내었다. 각각의 부계환이득은 표1과 같이 설정하였다. 그림으로부터 토오크 연산제어법에서는 피이드 포워드 제어법에 비하여 진동이 심하였지만, 과도시의 overshoot도 적고 전반적으로 추종오차는 작았다.

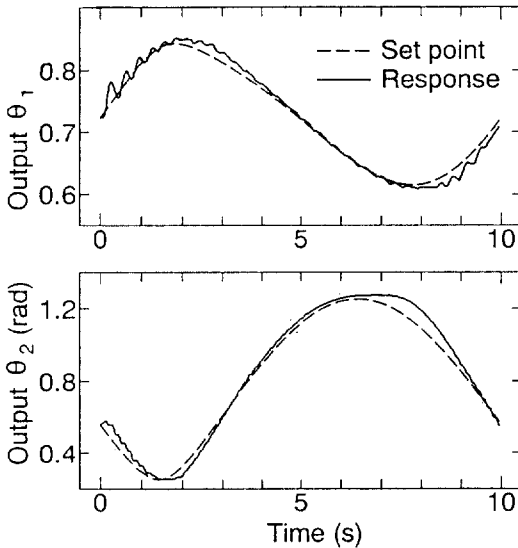


그림 10 피이드 포워드 제어법을 이용한 원궤적 추적결과

Fig. 10 Feedforward control result for circular trajectory

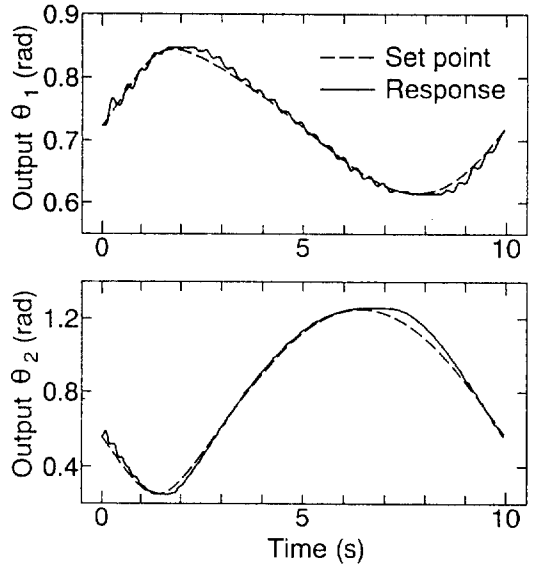


그림 11 토오크 연산 제어법을 이용한 원궤적 추적결과

Fig. 11 Computed torque control result for circular trajectory

6. 결 론

인공 고무근육을 이용한 2 링크 로봇트 매니퓰레이터의 원궤적 추종제어에 대한, 선형 피이드 포워드 제어와 토오크 연산제어의 2 종류의 제어법칙을 실험적으로 적용하였다. 진동기를 이용한 매니퓰레이터의 비선형 모델을 이용한 sliding 모드제어 등[4]과 비교하여 보면, 오차가 적지는 않으나, 공기압 구동형 고무 근육이 가지고 있는 성질을 감안한다면 만족할 만한 결과라 할 수 있겠다. 또한 피이드 포워드 제어 보다는 토오크 연산 제어법에서 전체적인 오차가 줄어드는 것을 알 수 있다. 이는 토오크 연산 제어법에서는 그림 9에서 보는 바와 같이 피이드포워드 제어에 비해 점선부분이 추가 보상이 되었기 때문이며, 보다 더 정확한 제어를 위한 비선형 모델을 근거로 한 비선형 제어 및 optimal servo controller의 설계에 관한 연구 수행 중이다.

참 고 문 헌

[1] 土方正志, “近未來の 異能, 異色 로봇트集合”, Trigger, Vol.11, No.2, pp.97-101, 1992.
 [2] 則次, 和田, “ゴム人工筋 로봇트 制御への

應用”, 日本 ロボット學會誌, Vol.9, No.4, pp. 502-506, 1991.

[3] 山藤和男, “空氣壓 アクチコエタの ロボット 制御への應用”, 日本 ロボット學會誌, Vol.9, No.4, pp.498-501, 1991.

[4] 大須賀公一, “ロボットのロバスト制御” 計測 自動制御 學會 論文集, Vol.30, No.8, pp.681-687, 1991.

[5] F.Miyazaki et al., “Cooperative and Learning Control for Complex Robot Systems”, Lecture Notes in Control and Information Sci-

es, Vol.139, Springer-Verlag, pp.84-99, 1989.

[6] 大須賀, 木村, 小野, うパチコエタの“H[∞] 制御” ロボチ イクスメットロニクス講演會 '90 講演 論文集, Vol.A,900-3, 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.

저자 소개

진상호(陳相浩) 1957년 6월 3일생. 1989년 북강공업대학 전자기계공학과 졸업. 1991년 佐賀대학 공학연구과 修士과정 졸업(석사). 1994년 동대학원 博士 과정 졸업. (박사) 현재 佐賀대학 이공학부 助手.

中村政俊 : 1943년 8월 20일생. 1973년 九州대학 공학연구과 대학원 졸업(공학). 同年 九州대학 助手. 현재 佐賀대학 이공학부 교수.

渡邊桂吾 : 1952년 4월 23일생. 1976년 德島대학 기계공학과 졸업. 1978년 동대학원 修士 과정 졸업(석사). 1980년 九州대학 助手. 1990년 佐賀대학 생산기계공학과 조교수. 현재 동대학 교수.



이석규(李錫圭)

1956년 12월 7일생. 1979년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1981년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 1990년 미국 U.C.L.A. 대학원 전기공학과 졸업(공학). 현재 영남대학교 전기공학과 부교수