직접구동형 로보트에 대한 퍼지 튜닝 이산시간 반복제어의 실시간 구현

김성현, 안현식, 김도현
국민대학교 전자공학과
136-702 서울특별시 성북구 정릉동 861-1
m962201@kmu1.kookmin.ac.kr

Real-time Implementation of a Fuzzy Tuning Discrete-Time Repetitive Control for a Direct Drive Robot

Sung-Hyun Kim, Hyun-Sik Ahn, Do-Hyun Kim
Department of Electronics Engineering, Kookmin University
861-1 Jeongnung-dong, Seongbuk-ku, Seoul 136-702, Korea
m962201@kmu1.kookmin.ac.kr

Abstract

In this paper, a fuzzy tuning discrete-time repetitive control is suggested for a robot manipulator. Real-time implementation of this type of repetitive controller is also performed for a 2 link direct drive robot by using a real-time control system which consists of a real-time OS(Spectra), a single board computer, a communication board and an analog input/output board. First, it is shown that the tracking error is effectively reduced by discrete-time repetitive control. Second, the convergence performance is shown to be much improved by the suggested controller using real-time experimentations.

I. 서 론

기존의 PD 제어, 토크 계산법(computed torque) 등은 제어기 설계에서 로보트의 정확한 수학적 모델링을 요구하지만 실제로 로보트의 비선형성을 정확히 모델링 하기 힘들기 때문에 이를 이용해서 개발한 제어기는 로보트의 연속 경로 제어에서 기대한 성능을 얻기가 어렵다. 이와 같은 문제를 해결하기 위해 모델링 오차에 민감하지 않은 학습제어 방법이 요구되었고 이를 이용한 많은 연구에서 로보트에 대한 제어에 효과가 있음이 알려져 있다[1]. 학습제어 방법은 특히 조립용 로보트 또는 도장 및 용접 로보트와 같이 주어진 작업 공간에서 특정한 임무를 반복적으로 수행하는 로보트에 대해 동작 수행시의 추종오차를 학습 알고리즘에 이용해서 다음 수행시의 추종오차가 감소하도록 하는 새로운 제어 입력을 계산하는 방법으로 원하는 경로에 대해서 완전 추종(perfect tracking)을 가능하게 한다.

반복제어는 이전 주기의 추종오차로 다음 주기의 제어 입력을 인가한다는 점에서 학습제어와 유사하다. 그러나 대부분의 학습제어는 학습과정과 적용과정이 분리되어 있어서 한 주기에 해당하는 시간구간 동안의 경로가 원하는 허용오차를 만족할 때까지 반복해서 학습하는 과정이 끝난 후에 적용하는 off-line 학습방법인 반면에, 반복제어는 학습과정과 적용과정이 분리되어 있지 않고 수행을 하는 동안의 추종오차를 한 주기만큼 시간 지연을 시켜서 연속적으로 다음 수행의 제어 입력을 계산하고 곧바로 인가하는 방법으로 추종오차를 감소시키는 on-line 학습 방법이다.

본 논문에서는 실시간 제어 시스템을 이용한 퍼지 튜닝 이산시간 반복제어의 실시간 구현을 다룬다. 이산시간 반복제어기의 수렴성을 개선시키기 위한 방법으로 반복제어 이득을 조절해 주는 퍼지 튜너를 구성한다. 퍼지 튜너는 추종오차를 계속적으로 감시하면서 언어화된 제어 규칙에 따라서 반복제어 입력을 조절하게 된다. Ⅱ장에서는 이산시간 반복제어에 대한 기초적인 이론들을 살펴보고 Ⅲ장에서 직접구동형 2축 로보트에 적용하기 위한 퍼지 튜닝 이산시간 반복제어기를 설계한다. Ⅳ장에서 제어시스템의 구성을 설명하고 직접구동형 2축 로보트에 대한 실험 결과를 보인다. 결론은 Ⅴ장에서 보이도록 한다.

II. 이산시간 반복제어

다음과 같은 시스템 전달함수를 고려해 보자.

$$G_s(z^{-1}) = \frac{z^{-d}B(z^{-1})}{A(z^{-1})} \tag{1}$$

$$e(k) = G_s(z^{-1})u_r(k) \tag{2}$$

반복제어에서는 식 (1)과 같이 주어지는 시스템이 점근적으로 안정하고 주기적인 동작경로를 가지고 있을 때, 추종오차가 영으로 수렴하면서 시스템의 점근적 안정성을 보장하는 반복제어 입력 $u_r(k)$ 을 구하는 것이 목적이다. 즉, 다음의 식 (3)을 만족하는 반복제어 입력 $u_r(k)$ 을 구하는 것이다.

$$\lim_{k\to\infty} e(k) = 0 \tag{3}$$

여기서 $G_s(z^{-1})$ 는 시스템 전달 함수, d는 시스템이 가지는 지연의 수, $e(k)$ 는 추종 오차, $u_r(k)$은 반복제

어 입력이다. 이를 만족하는 반복제어 입력을 구하기 위해서 다음과 같은 형태의 반복제어기를 고려해 볼 수 있다.

$$u_r(k) = G_g(z)G_f(z^{-1})e(k) \tag{4}$$

$G_g(z)$는 반복신호 발생기를 나타낸다. 일반적인 반복제어기는 Internal model principle에 의해서 다음과 같은 반복신호 발생기를 포함하고 있어야 한다[2].

$$G_g(z) = \frac{k_r z^{-N_1}}{1-z^{-N}} = \frac{k_r z^{N_2}}{z^N - 1}, \qquad N_1, N_2 \geq 0 \tag{5}$$

여기서 N은 한 주기에 해당하는 시간 지연의 수이고 $N_1 + N_2 = N$, k_r은 반복제어 이득이다. 반복신호 발생기와 시스템 전달 함수 사이에 들어가는 순방향 제어기 $G_f(z^{-1})$는 다음과 같다.

$$G_f(z^{-1}) = \frac{A(z^{-1})}{B(z^{-1})} \tag{6}$$

식 (6)은 시스템 전달함수의 영점과 극점을 소거시켜 완전추종을 가능하게 하는 완전추종 제어기(perfect tracking controller)의 형태를 가지고 있다. 이런 경우 식 (5)의 $N_2 = d$로 설정한다. 이와 같이 구성된 반복제어 시스템은 다음 두가지 정리에 의해서 점근적 안정성이 보장된다.[3]

정리 1. 반복제어 시스템에서 시스템 전달함수 $G_s(z^{-1})$가 점근적으로 안정하다면 오차 $e(k)$는 점근적으로 영으로 수렴한다.

정리 2. 반복신호 발생기 $G_g(z^{-1})$과 순방향 제어기 $G_f(z^{-1})$로 구성되는 반복제어 시스템은 반복제어 이득이 $0 < k_r < 2$에 대해서 점근적으로 안정하다. ■

III. 직접구동형 로보트에 대한 퍼지 튜닝 이산시간 반복제어기 설계

직접구동형 2축 로보트에 대한 동력학 방정식은 다음과 같다.

$$\mu(\theta)\ddot{\theta} + V(\theta,\dot{\theta}) + G(\theta) = \tau - F \tag{7}$$

여기서 $\mu(\theta)$는 2×2 질량 행렬, $V(\theta,\dot{\theta})$는 2×1 코리올리력 및 원심력 벡터, $G(\theta)$는 2×1 중력 벡터, θ는 2×1 위치 벡터, τ는 2×1 토오크 벡터, F는 2×1 쿠울롱 마찰력 벡터이다. 정리 1에서 시스템 전달 함수가 점근적으로 안정하다는 가정을 만족시키기 위해서 먼저 토크 계산법으로 로보트 시스템에 대한 제어기를 설계한다. 토크 계산법에 의한 제어 법칙은 다음과 같다.

$$\tau = \mu(\theta)u(t) + V(\theta,\dot{\theta}) + G(\theta) + F \tag{8}$$

$$u(t) = \ddot{\theta}_d + K_p(\theta_d - \theta) + K_d(\dot{\theta}_d - \dot{\theta}) \tag{9}$$

여기서 θ_d는 원하는 경로이고 K_p, K_d는 각각 비례 궤환 제어 이득, 미분 궤환 제어 이득이다. 식 (8)과 식 (9)을 식 (7)에 대입해서 정리하면 다음과 같다.

$$\ddot{e}(t) + K_d\dot{e}(t) + K_p e(t) = 0 \tag{10}$$

여기서 $e = \theta_d - \theta$이다. 이 방정식이 안정하도록 비례 궤환 제어 이득과 미분 궤환 제어 이득을 설정하면 로보트 시스템은 점근적으로 안정한 시스템이 된다. 본 논문에서는 K_p는 324, K_d는 25.4로 설정한다. 이로부터 반복제어 입력을 고려해서 시스템 전달함수를 구할 수 있고 이산시간 반복제어의 샘플링 시간을 40ms로 설정하여 이산시간 시스템 전달함수를 구한다.

$$G_s(z^{-1}) = \frac{z^{-1}\times 10^{-3}(0.5625 + 0.3993z^{-1})}{1 - 1.0496z^{-1} + 0.3613z^{-2}} \tag{11}$$

식 (11)로부터 식 (5)와 식 (6)에 의해서 다음과 같은 이산시간 반복제어기를 구할 수 있다.

$$u_r(k) = \frac{k_r z}{z^{100} - 1}\,\frac{1 - 1.0496z^{-1} + 0.3613z^{-2}}{10^{-3}(0.5625 + 0.399z^{-1})}e(k) \tag{12}$$

식 (12)에서 반복제어 이득 k_r을 조절하기 위한 퍼지 튜너는 퍼지 입력 변수로서 오차와 오차의 변화량을 사용하고 출력 변수는 반복 제어 이득을 변화시키기 위해서 곱해지는 이득 조절 factor를 사용한다. 매 주기마다 추종오차의 최대값을 입력받아서 이전 주기의 추종오차보다 추종오차가 작아지고 있으면 반복제어 이득을 크게하거나 유지시킨다. 반면에 추종오차가 커지고 있으면 반복제어 이득을 줄여서 반복제어 입력의 양을 줄인다. 이와 같이 수렴경향에 따라서 반복제어 입력을 조절하는 퍼지 규칙을 다음 표 1에서 나타낸다. 퍼지 추론법으로는 Max-Min 합성법을 사용하고 비퍼지화 방법으로는 무게중심법을 사용한다.

표 4.1. 퍼지 규칙표

ΔE \ E	ZO	VS	SM	MD	LG	VL	BG
NB	NC	NC	NC	NC	MS	MS	MC
NM	NC	NC	NC	MS	MS	MC	MM
NS	NC	NC	MS	MS	MC	MM	ML
ZO	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC
PS	NC	NC	DS	DS	DC	DC	DM
PM	NC	DS	DC	DC	DM	DM	DL
PB	NC	DC	DC	DM	DM	DL	DB

NC : No Change, M : Multiply, D : Divide
Small, Compact, Medium, Large, Big

IV. 실시간 실험

로보트의 연속 경로추종 실험을 수행하기 위하여 구성된 실험 환경은 그림 1과 같다. 호스트 컴퓨터로서 Sparc II Workstation을 이용하고, 실시간 제어시스템은 실시간 운영체제인 Spectra를 탑재한 단일 보드 컴퓨터(VM 30), 아날로그 입력/출력 보드(VDAD), 호스트 컴퓨터와 단일 보드 컴퓨터간의 통신을 위한 보드(VCOM) 및 펄스 계수용 보드(PB_CNT) 등으로 구성되며 모든 보드는 VME bus를 사용하고 있다. 또 링크 구동형 모터로서 NSK 사의 14형과 06형을 각각 링크 1 및 2에 장착시켜 사용한다. 두 축에 대한 기준 입력 신호를 만들기 위해 사용한 식은 다음과 같다.

$$\theta_d(t) = 1 - \cos(\frac{\pi}{2}t) \qquad (13)$$

이산시간 반복제어기는 식 (12)를 사용하였고 반복제어 이득은 시행착오를 거쳐서 1 축에 대해서 0.9, 2 축에 대해서 0.03 으로 설정하였다. 그림 2 는 이산시간 반복제어를 적용하였을 때 2 축에 대한 실험 결과이다. 토크 계산법만을 사용했을 경우 전체 시간구간에서 동일하게 나타나던 추종오차가 매 주기마다 이산시간 반복제어에 의해서 감소되어 나가는 것을 보이고 있다. 또 그림 3 은 퍼지 튜닝 이산시간 반복제어 적용시 2 축에 대한 실험 결과로서 고정된 반복제어 이득을 사용한 그림 2 에 비하여 추종오차가 빠르게 감소함을 볼 수 있다. 실제로 그림 2 에서는 46 초 이후부터 0.01[rad] 이하로 수렴하였고 그림 3 에서는 28 초 이후부터 0.01[rad] 이하로 수렴하였다. 실험 종료시 퍼지 튜너에 의해 조절되어 1 축에 사용된 반복제어 이득은 1.847 이었고 2 축에 사용된 반복제어 이득은 0.049 이었다.

V. 결 론

본 논문에서는 직접구동형 2 축 로보트에 대해서 퍼지 튜닝 이산시간 반복제어를 이용한 제어기를 설계하였다. 제안된 방법을 사용하여 직접구동형 로보트의 각 축에서 매 주기마다 발생하는 추종오차를 빠르게 감소시키면서 최적의 반복제어 이득을 찾을 수 있음을 실시간 제어시스템을 이용한 실험을 통해서 확인하였다.

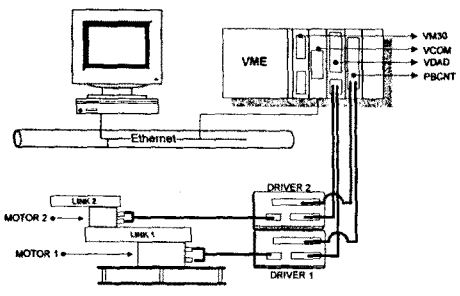

그림 1. 실시간 제어시스템의 구성

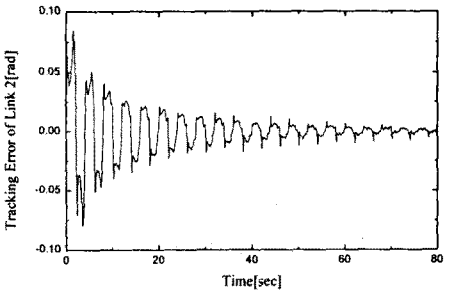

그림 2. 이산시간 반복제어의 실험결과

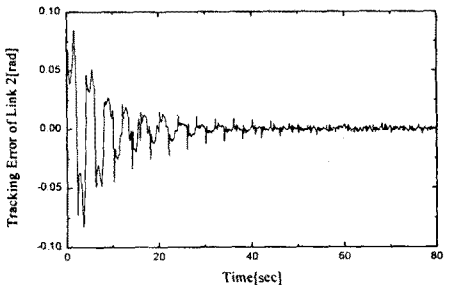

그림 3. 퍼지 튜닝 이산시간 반복제어의 실험결과

참고문헌

[1] S. Arimoto, S. Kawamura, and F. Miyazaki, "Bettering operation of robots by learning," *J. Rob. Syst.*, vol. 1, no. 2, pp. 123-140, 1984.

[2] B. A. Francis, and W. M. Wonham, "The Internal Model Principle for Linear Multivariable Regulators," *Appl. Math. and Opt.*, vol. 2, pp. 170-194, 1975.

[3] M. Tomizuka, T. C. Tsao, and K. K. Chew, "Discrete-Time Domain Analysis and Synthesis of Repetitive Controllers," *Proc. of 1988 American Control Conference*, pp. 860-866, 1988.

[4] M. Tomizuka, "Zero-Phase Error Tracking Algorithm for Digital Control," *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Trans. of ASME*, vol. 109. no. 1, pp. 65-68, 1987.

[5] S. Hara, Y. Yamamoto, T. Omata, and M. Nakano. "Repetitive Control System: A new Type Servo System for Periodic Exogenous Signals," *IEEE Trans. on Automatic Control*, vol. 33, No. 7, pp. 659-668, 1988.

[6] M. Nakano, and S. Hara, "Microprocessor-based Repetitive Control," *Microprocessor-based Control Systems*, pp. 279-296, 1986.

[7] M. C. Tsai, G. Anwar, and M. Tomizuka, "Discrete-Time Repetitive Control for Robot Manipulators," *Proc. 1988 IEEE Int. Conf. Robot. Automation*, vol. 3, pp. 1341-1347, 1988.