

반복 학습 제어를 이용한 2관성 공진계의 위치 제어 관한 연구

Study on Position Control of 2-Mass Resonant System Using Iterative Learning Control

이 학성*, 문승빈**

*세종대학교 전자공학과 ** 세종대학교 컴퓨터공학과

Hak-Sung Lee and Seungbin Moon

Dept. of Electronic Engineering, Sejong University

E-mail : hslee@sejong.ac.kr

ABSTRACT

2관성 공진계는 전동기와 부하 사이에 탄성이 있는 동력 전달 체계를 포함하는 시스템으로 고속 제어시 진동이 발생된다. 이와 같은 2관성 공진계에 대해 궁극적인 출력이 되는 부하의 위치 및 속도는 측정하기가 어렵다. 이에 기존의 연구들은 추정기등을 이용하여 부하의 속도를 추정하여 이를 제어에 활용하는 방식으로 구성되어진다. 그러나 이와 같이 추정기를 사용하기 위해서는 정확한 모델이 필요하다. 본 논문에서는 다소 부정확 모델에 대해서도 매우 정교한 제어 성능을 갖는 반복 학습 제어를 이용하여 2관성 공진계의 위치 제어를 시도하고자 한다. 제시된 방법은 2관성 공진계에 대한 모델링이 정확하지 않더라도 진동 없이 정확한 위치 제어가 가능하다.

1. 서 론

대부분의 로봇등의 메카트로닉스 시스템은 DC혹은 AC모터와 감속을 위한 harmonic drive로 구성되어 있다. 이 harmonic drive로 인해 로봇의 joint에는 flexibility가 존재하고 이는 로봇 arm에 진동을 유발하는 한 원인이 된다. 이와 같이 모터와 부하사이에 동력을 전달하는 요소가 flexibility를 갖는 기계계를 2관성 공진계(2-Mass Resonant System)라고 한다. 2관성 공진계에 대해 보통 널리 이용되어지고 있는 PI 속도제어를 사용하여 응답이 빠른 속도제어를 하려고 제어이득을 크게 하면 공진에 의해 축 비틀림 진동이 일어나는 경우가 많다. 이 진동은 통상 장시간의 잔류 시간을 가지고 있어 정착 시간(Settling Time)을 증대시키거나 정밀도를 떨어트려 해당 시스템의 성능을 떨어트리는 경우가 일반적이다. 따라서 생산성 향상을 도모하기 위해 이러한 2관성 공진계가 갖는 전동기의 속도 또는 위치

제어에 있어서 고정밀/고속응답이 절실히 요구되고 있다. 한편, 이와 같은 2관성 공진계의 축 비틀림 진동을 억제하기 위하여, 외란 관측기(Disturbance Observer)를 이용하는 방법 [1], LQG제어를 이용하는 방법 [2] H-infty 필터를 이용한 제어 방법 [3] 등이 연구되어지고 있다. 이러한 연구들은 기본적으로 관측기(Observer)로 측정 불가능한 변수를 관측하여 이를 PI제어 혹은 상태 궤환(State Feedback)하는 방식으로 구성되어 있다. 이러한 방식들은 기본적으로 측정이 불가능한 변수를 관측하기 위한 관측기를 사용하기 때문에 모델이 비교적 정확한 시스템에 적용이 가능하다. 최근에 반복 학습 제어를 이용하여 모델링 오차가 비교적 큰 시스템에도 속도 제어시 진동 억제를 효과적으로 수행하는 제어 기법이 소개되었다 [6]. 본 논문에서는 반복 학습 제어 기법을 이용하여 2관성 공진계에서의 위치 제어를 수행하고자 한다. 제안된 방식은 모델링 오차가 비교적 크더라도 진동없이 정확한 위치 제어

성능을 보여준다.

II. 2관성 공진계

Flexibility를 갖는 동력 전달 요소에 의해 모터와 부하가 연결된 2관성계는 그림 1과 같다. 여기서 사용된 각 변수는 다음과 같다.

- J_1 (J_2): 모터(부하)의 관성 모멘트
- K_{12} : 축 비틀림 상수
- θ_1 (θ_2): 모터(부하)의 회전 각도
- ω_1 (ω_2): 모터(부하)의 각속도
- T_m : 모터 발생 토크

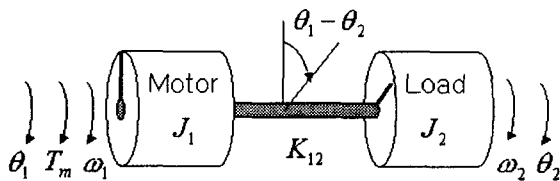


그림 1. 2관성 공진계

이제 부하 외란 토크(T_L)를 영이라 가정하고, 그림 1의 2관성 공진계에 대해 상대 방정식을 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx \end{aligned} \quad (1)$$

여기서

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -K_{12}/J_1 & 0 & K_{12}/J_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ K_{12}/J_2 & 0 & -K_{12}/J_2 & 0 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1/J_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$C = [1 \ 0 \ 0 \ 0]$$

이고, $x = [\theta_1 \ \omega_1 \ \theta_2 \ \omega_2]^T$, $u = T_m$ 이다. 식(1)의 2관성 공진계에서 실제로 제어 대상이 되는 변수는 로봇 arm등의 부하의 회전 각도 θ_2 이나, 센서등의 문제로 이의 측정이 어렵고, 실제로 측정가능한 변수는 모터의 회전 각도 θ_1 이다.

III. 학습 제어에 의한 위치 제어

본 절에서는 앞 절에서 소개된 2관성 공진계의 위치 제어에 대해 반복 학습제어 기법

을 적용하는 문제에 대해 논의 한다. 한편, 반복 학습 제어는, 어떤 주어진 작업이 반복적으로 이루어 질 때, 이전 반복의 오차 정보를 활용하여 다음 반복에서의 제어 성능을 개선하는 방식으로 구성되어 있다[4][5][6]. 이때, 이전 반복의 오차 정보를 어떻게 활용하는가에 따라 반복 학습제어의 구조가 달라지지만, 본 논문에서는 그 중 널리 사용되고 있는 PD-type 학습제어 기법을 고려한다.

$$u_{k+1}(t) = u_k(t) + \Gamma(\dot{e}_k(t) + Re_k(t)) \quad (3)$$

여기서 첨자 k 는 반복 횟수를 나타내고, $e(t)$ 는 원하는 출력 궤적($y_d(t)$)과 실제 출력 궤적($y(t)$)간의 오차를 나타낸다.

식(3)의 PD-type 학습 제어기의 수렴 조건은

$$\|I - \Gamma CB\| < 1 \quad (4)$$

로 알려져 있다. 이 때, 식(2)로부터 $CB = 0$ 이므로 식(3)의 반복 학습 제어 기법은 식(1)(2)의 2관성 공진계의 위치 제어계에 적용이 불가능한 것을 알 수 있다. 이 경우 식(3)의 학습 법칙을 다음과 같이 변형하면 적용이 가능해진다.

$$u_{k+1}(t) = u_k(t) + \Gamma(\dot{e}_k(t) + R \dot{e}_k(t)) \quad (5)$$

학습 법칙 식(5)는 식(3)의 반복간의 학습으로 갱신되는 신호를 한차례 더 미분하는 것으로 구성되어 있다. 이 경우 학습 제어기의 수렴 조건은

$$\|I - \Gamma CAB\| < 1 \quad (6)$$

이며, 식(2)로부터 $CAB = 1/J_1$ 이므로 만약 식(1)(2)의 2관성계에 이 반복 학습 제어 법칙을 적용할 경우 학습 제어 법칙을 설계하기 위해 필요한 정보는 전동기의 관성 모멘트(J_1)뿐이다. 따라서 다소 모델이 부정확한 2관성 공진계에 대해서도 식(5)의 학습 제어 기법의 적용이 가능하다.

한편, 식(5)의 학습 제어 기법은 제어 대상 시스템의 출력이 미리 정해진 원하는 출력 궤적을 추종하는 문제에 적용 가능하다. 따라서 이와 같은 학습 제어를 적용하기 위해서는 출발 각도 위치에서 최종 목표 각도 위치까지의 위치 경로가 적절히 설정되어야 한다. 또 식

(6)의 수렴 조건은 모터의 회전 각도(θ_1)를 출력으로 하였을 때에는 적용이 가능하나, 2관성 공진계의 실제 제어 대상이 되는 부하의 회전 각도(θ_2)에 대해서는 적용이 불가능하다. 게다가 앞 절에서 언급한 바와 같이 일반적으로 부하의 회전 각도(θ_2)는 측정이 불가능하다. 따라서 반복 학습 제어기법을 2관성계의 부하측 위치제어에 응용하기 위해서는 (i) '주어진 Set Point간의 위치 경로 설정' (ii) '측정되지 않는 θ_2 에 대한 학습 제어 적용' 등의 문제가 해결되어야 한다.

3.1 set point간의 위치 경로 선정

위치 제어에 있어서 진동이 문제가 되는 경우는 이동 경로상에서가 아니라 최종 목표치에 도달 하였을 때이다. 따라서 set point간의 위치 경로의 설정시 출발과 최종 목표에서의 적절한 감속이 진동억제에 매우 중요하다. [6]에서는 출발과 최종 목표치에서 정상 상태라 가정하고 속도 궤적의 조건을 제시하였다. 이를 위치 궤적 조건으로 변경하면 다음과 같다. 부하측 회전 각도가 $\theta_2(t_1)=a$ 에서 $\theta_2(t_2)=b$ 로 변경하는 상황을 고려하자. 이때 이 set point를 정상 상태로 간주하면 시간 t_1, t_2 에서 다음 조건을 얻는다.

$$\theta_2^d(t_1) = 0 \quad \omega_2^d(t_1) = \frac{d}{dt} \omega_2(t_1) = \frac{d^2}{dt^2} \omega_2(t_1) = 0 \quad (7)$$

$$\theta_2^d(t_2) = 0 \quad \omega_2^d(t_2) = \frac{d}{dt} \omega_2(t_2) = \frac{d^2}{dt^2} \omega_2(t_2) = 0$$

3.2 부하의 회전 속도에 대한 학습 제어 적용

2-관성 공진계에서 부하의 회전속도(θ_2)의 검출이 불가능하므로 검출이 용이한 모터의 회전 각도(θ_1)를 이용하여 진동 억제를 수행한다. 식(1)(2)에 의하면, 이 두 회전 각도는 다음과 같은 관계를 갖고 있음을 알 수 있다.

$$\frac{d}{dt} \omega_2 = K_{12} / J_2 (\theta_1 - \theta_2) \quad (8)$$

위 식으로부터 부하의 회전 속도에 대한 원하는 각도 궤적을 $\theta_2^d(t)$ 라 하면, 모터의 원하는 각도 궤적을 $\theta_1^d(t)$ 은 다음과 같다.

$$\theta_1^d(t) = \theta_2^d(t) + \frac{J_2}{K_{12}} \frac{d^2}{dt^2} \theta_2^d(t) \quad (10)$$

따라서 모터의 회전 각도를 위와 같이 정의된 각도 궤적을 추종하도록 하면 검출이 어려운 부하의 회전 각도가 주어진 각도 궤적 $\theta_2^d(t)$ 를 추종하도록 하는 것이 가능하다.

IV. 모의 실험

본 논문에서 제안한 기법의 유효성을 검증하기 위해 [1]에서 제시된 2관성 공진계의 위치에 적용하였다. 시뮬레이션에 사용된 2관성 공진계에 대한 계수는 다음과 같다.

$$J_1 = 0.016 \text{ kg m}^2 \quad J_2 = 0.004 \text{ kg m}^2$$

$$K_{12} = 1.2938 \text{ kg m}^2$$

이 2 관성 공진계의 부하의 회전 각도를 0[rad]에서 5[rad]이 되도록 하되 settling time이 1.5초 이내가 되게 하도록 하고자 한다. 이의 조건과 식 (7)을 고려하여 부하의 위치 각도에 대한 원하는 위치 궤적생성하고 또 식(8)을 이용하여 이에 대응하는 모터의 원하는 위치 궤적을 정의하면 그림 2와 같다. 한편 이 위치 궤적에 대응하는 속도 궤적을 구하면 그림 3과 같다.

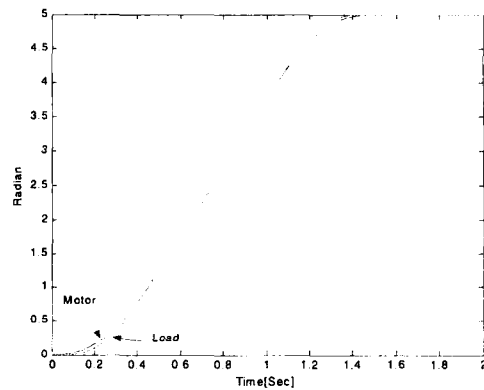


그림 2. 부하 및 모터에 대한 원하는 각도궤적

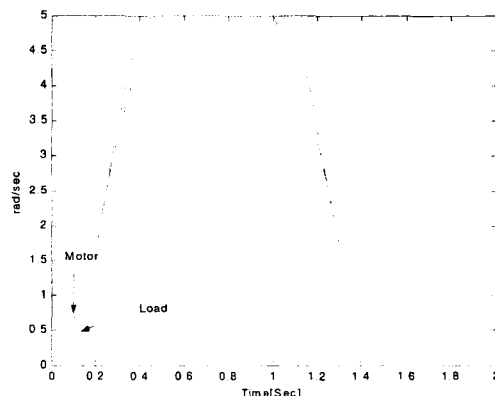


그림 3. 부하 및 모터에 대한 원하는 속도궤적

이 속도 궤적에 식(6)의 학습 제어기는 이 용하였고, 수렴 조건등을 고려하여 $\Gamma = 0.0112, R = -2.0$ 으로 선정하였다. 그림

4.은 시행 횟수에 대한 부하측의 속도 오차를 보여주고 있다. 그림 5.에서 볼 수 있듯이 제안된 방식에 의해서 2관성 공진계의 부하의 위치 각도가 진동없이 원활히 제어됨을 알 수 있다.

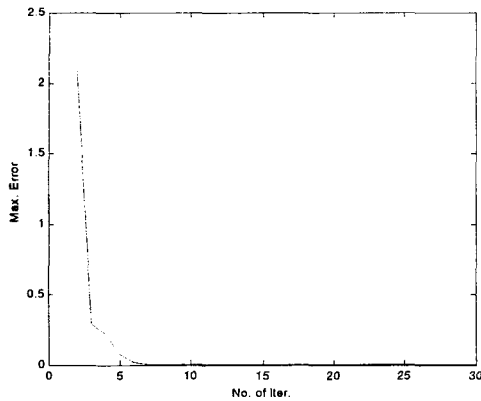


그림 4. 부하측 각속도오차

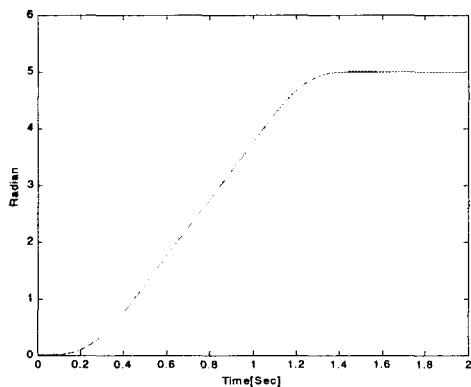


그림 5. 부하에 대한 각도 궤적 출력

V. 결 론

본 논문에서는 2관성 공진계의 위치 제어를 위해 반복 학습 제어 기법을 적용하는 새로운 방식을 제안하였다. 제어 대상이 되는 부하의 회전 각도 및 각속도는 학습 제어로 직접 적용하기가 힘들고 또한 측정 또한 어렵다. 본 논문에서는 부하의 회전 각도와 모터의 회전 각도간의 관계를 이용하여 직접 부하의 회전 각도를 제어하는 대신 전동기의 회전 각도를 제어하여 간접적으로 부하의 회전 속도를 제어하였다. [1]의 2관성 공진 시스템을 대상으로 적용한 결과 응답 속도도 빠르면서 진동이 억제되는 것을 볼 수 있다. 제안된 방식은 모델에 대한 의존도가 적으므로 모델이 부정확하더라도

도 진동없이 정확하게 부하의 회전 각도를 제어하는 것이 가능하다. 또한 주어진 회전 각도에 대한 궤적을 변경함에 따라 고속의 위치 제어도 가능하다.

감사의 글 : 본 연구는 한국산업자원부 부품 소재 개발 사업에 의하여 수행되었습니다.

IV. 참고문헌

- [1] K. Sugiura and Y. Hori, "Vibration Suppression in 2- and 3-Mass System Based on the Feedback of Imperfect Derivative of the Estimated Torsional Torque," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol.43, no.1, February 1996, pp. 56-64.
- [2] J. K. Ji and S. K. Sul, "Kalman Filter and LQ Based Speed Controller for Torsional Vibration Suppression in a 2-Mass Motor Drive System," *IEEE Transactions on Industry Electronics*, vol.42, no.6, December 1995, pp.564-571.
- [3] J. S. Kim, S.U. Kim and Y.S. Kim. "The Vibration Suppression Control of the Two-Mass Resonant System Using the H-infty Filter", *Trans. KIEE*, Vol 47, No. 4 1998
- [4] S. Arimoto, S. Kawamura, and F. Miyazaki, "Bettering operation of robots by learning," *Journal of Robotics System*, vol. 1, no. 2, pp.123-140, 1984.
- [5] H. S. Lee and Z. Bien, "Design Issues on Robustness and convergence of a iterative learning controller," in *Intelligent Automation and Soft Computing*, vol. 8, no. 2, pp 95-106, 2002.
- [6] H. S. Lee, "Study on Vibration Suppression of 2-Mass Resonant System Using Iterative Learning Control," in *대한전자공학회 하계학술대회논문집* p. 79-82, 2003