퍼지 및 지능시스템학회 논문지 2004, Vol. 14, No. 6, pp. 693-698

반복 학습 제어를 이용한 2관성 공진계의 위치 제어에 관한 연구

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

이학성* · 문승빈**

Hak-Sung Lee and Seungbin Moon

* 세종대학교 전자공학과

** 세종대학교 컴퓨터공학과

요 약

2관성 공진계는 전동기와 부하 사이에 탄성이 있는 동력 전달 체계를 포함하는 시스템으로 고속 제어시 진동이 발생된다. 본 논문에서는 반복 학습 제어를 이용하여 이와 같은 2관성 공진계의 위치 제어에 대한 진동 억제 기법을 제안한다. 제안된 기법은 측정하기 어려운 부하에 대해 진동이 발생하지 않는 속도궤적을 산출하고 이에 해당하는 전동기 속도 및 위치 궤적에 대해 반복 학습 제어기법을 적용하는 방식으로 구성되어 있다. 또한 초기 위치 오차에 의해 발생되는 진동을 억제하기 위한 방법도 제시된다. 제안된 방법은 2 관성 공진계에 대한 모델링이 정확하지 않더라도 진동 없이 정확한 위치 제어가 가능하다.

Abstract

In this paper, an iterative learning control method is applied to suppress a vibration of a 2-mass system which has a flexible coupling between a load and a motor. More specifically, conditions for the load speed without vibration are derived based on the steady-state condition. And the desired motor position trajectory is synthesized based on the relation between the load and motor speed. Finally, a PD-type iterative learning control law is applied for the desired motor position trajectory. Since the learning law applied for the desired trajectory guarantees the perfect tracking performance, the resulting load speed shows no vibration even when there exist model uncertainties. A modification to the learning law is also presented to suppress undesired effects of an initial position error. The simulation results show the effectiveness of the proposed learning method.

Key words : 반복 학습 제어, 2관성 공진계, 진동 억제, 위치 제어

1. 서 론

대부분의 로봇등의 메카트로닉스 시스템은 통상 실제 운동을 위한 힘을 발생시키는 전동기(motor), 발생된 힘에 의해 움직이는 부하(load) 그리고 전동기와 부하사이에 힘을 전달하는 동력 전달 요소(power transmission element)등으로 구성된다. 이러한 동력 전달 요소로는 기어, 축, 감속기 등을 들 수 있는데, 이 동력 전달 요소의 강성이 작은 경우 전동기의 관성과 부하의 관성 차이에 의해 비틀림 토크가 발생되며 이로 인해 부하에 원치 않는 진동이 유발되기도 한다. 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 위치제어에 있어서 고정밀/고속응답이 절실히 요구되고 있다.

이와 같은 2관성 공진계의 축 뒤틀림 진동을 억제하기 위해서는 동력 전달요소에 작용하는 비틀림 토크와 부하에 대한 위치 및 속도등의 물리량에 대한 정보가 필수적이나, 통상 이에 대한 측정이 어렵거나 불가능한 경우가 많다. 이에 따라 2관성 공진계에 대한 제어 방식은 측정 불가능한 제어변수를 관측기(observer)를 이용하여 관측하고 이를 이용하여 제어기를 구성하는 방식으로 연구가 진행되어 왔다. [1][2]에서는 외란 관측기(disturbance observer)를 이용하여 비틀림 토크를 관측하고 이를 기존의 PI제어기와 함께 사용하는 방식을 제안하고 있다. Ji등은 2 관성 공진계의 변수들을 관측하기 위한 Kalman filter를 설계하였고 이를 이용하여 full state feedback 제어기와 적분제어기를 구성하는 방법에 대해 다루고 있다.[3] 또한 Kim등은 H_∞ 필터를 이용하여 관측기의 추종 성능을 높였다[4]. 한편 일반적으로 관측

접수일자 : 2003년 12월 17일
완료일자 : 2004년 9월 30일
감사의 글 : 본 연구은 한국산업자원부 부품 소재 개발 사업에 의해 지원 받았습니다.

기는 제어 대상 시스템에 대한 정확한 모델을 필요하고 또 관측기의 관측 성능이 우수하기 위해서는 모델에 사용되는 계수에 대한 정밀한 수치가 요구된다. 2관성 공진계에 있어 관측기 모델에 사용되는 계수들로는 축의 비틀림 상수 또는 부하의 관성 계수 등을 들 수 있다. 그러나 이와 같은 계수는 구하기가 어렵고 특히 부하의 관성 계수는 로봇의 부하 및 로봇 팔의 Kinematics등에 의해 달라지므로 정확한 수치를 추정하는데 어려움이 있다. 이로 인해, 관측기에서는 다소 부정확한 계수를 사용할 수밖에 없고 이로 따라 적절한 진동 억제가 이루어지지 않을 수 있다. Hashimoto등은 autoregressive exogenous(ARX) 모델을 이용하여 변화한 시스템에 대한 변수등을 추정하고 이를 제어에 이용하는 방식을 제안했다.[5]

최근에는 반복 학습 제어(iterative learning control)를 이용하여 모델링 오차가 비교적 큰 시스템의 경우에도 속도 제어시 진동 억제를 효과적으로 수행하는 제어 기법이 소개되었다[6][7]. 제안된 방식은 먼저 진동이 발생하지 않는 속도 궤적을 산출하고 이 산출된 궤적에 대해 반복 학습 제어를 적용하는 방식으로 구성되어 있다. 반복 학습 제어는 제어 대상에 대한 모델이 부정확하더라도 주어진 목표 궤적에 대한 완벽 추종(perfect tracking)을 보장하는 특성이 있다. 즉 반복 학습 제어에 의해 진동을 유발하지 않는 속도 궤적에 완벽한 추종이 가능하므로 모델의 불확실하더라도 진동 없는 속도 제어가 가능하다.

본 논문에서는 반복 학습 제어 기법을 이용하여 2관성 공진계에서의 위치 제어를 수행하고자 한다. 이를 위해 본 논문에서는 i) 진동을 유발하지 않는 위치 궤적에 대해 다루고, ii) 기존의 속도 제어계에 적합하게 구성되어진 반복 학습 제어기를 위치 제어계 형태로 변환하며, iii) 초기 위치 오차에 의한 진동 억제 방안을 제시하고자 한다. 제안된 방식은 모델링 오차가 비교적 크더라도 진동 없이 정확한 위치 제어 성능을 보여주고 기존의 속도 제어와 달리 초기 위치 오차를 진동없이 제거 하는 성능을 가지고 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 1절의 서론에 이어 2절에서는 본 논문의 대상 시스템인 2관성 공진계에 대해 다룬다. 3절에서는 진동이 유발되지 않는 속도 및 위치 궤적에 대해 논하고 4절에서는 2관성 공진계의 위치 제어를 위한 반복 학습 제어 기법을 소개한다. 5절에서는 컴퓨터 모의 실험을 통해 제안된 방식 우수성을 소개하고 6절의 결론으로 본 논문을 맺는다.

2. 2관성 공진계

Flexibility를 갖는 동력 전달 요소에 의해 전동기와 부하가 연결된 2관성 공진계는 그림 1과 같다. 여기서 사용된 각 변수는 다음과 같다.

J_1 (J_2) : 전동기(부하)의 관성 모멘트
K_{12} : 축 비틀림 상수
θ_1 (θ_2) : 전동기(부하)의 회전 각도
w_1 (w_2) : 전동기(부하)의 회전 각속도
T_m : 모터 발생 토크

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

$$\dot{x} = Ax + Bu$$
$$y = Cx \tag{1}$$

여기서

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

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

이고, $x = [\theta_1\ w_1\ \theta_2\ w_2]^T$, $u = T_m$이다. 식(1)의 2관성 공진계에서 실제로 제어 대상이 되는 변수는 부하의 회전 각도 θ_2이나, 센서등의 문제로 이의 측정이 어렵고, 실제로 측정 가능한 변수는 전동기의 회전 각도 θ_1이다.

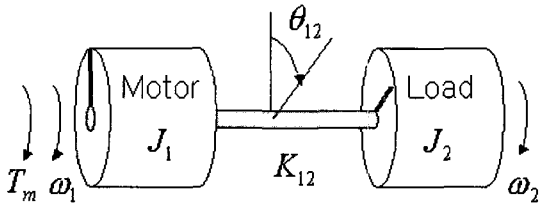

그림 1. 2관성 공진계.
Fig. 1. Two-mass resonant system without load torque

3. 진동을 유발하지 않는 속도 및 위치 궤적

본 논문에서는 2절에서 소개된 2관성 공진계에 대해 반복 학습 제어 기법을 이용하여 진동을 억제하는 기법을 이용하고 있다.[6][7] 한편 앞서 설명했듯이 실제로 제어 대상이 되는 변수는 부하의 속도이나 실제로 측정 가능한 변수는 전동기의 속도이다. 따라서 이와 같은 2관성 공진계에서는 실제 제어 대상이 되는 부하의 속도 또는 위치를 대상으로 반복 학습 제어를 적용할 수 가 없다. 이처럼 제어 대상이 되는 변수와 측정이 가능한 변수가 서로 다르기 때문에 본 논문에서는 전동기의 속도 및 위치 정보를 이용하여 간접적으로 부하의 위치 및 속도를 제어하도록 한다. 이를 위해 먼저 진동이 발생하지 않은 부하 속도 및 위치 궤적을 생성하고, 식(2)에서의 부하와 전동기간의 상관 관계를 나타내는 식을 이용하여 앞서의 부하 속도/위치 궤적에 대응하는 전동기의 속도/위치 궤적을 산출한다. 이렇게 생성된 전동기의 속도/위치 궤적에 대해 4절의 반복 학습 제어 알고리즘을 적용한다.

3.1 진동을 유발하지 않은 부하의 속도 궤적 조건

시작 시점(t_1)에서의 회전 각도가 a, 종료 시점(t_2)에서 회전 각도가 b가 되도록 위치 제어를 하고 있다고 가정하자. 진동이 발생하지 않을 조건을 이동의 시작 시점과 종료 시점에서 시스템의 상태(state)가 평형이라고 가정하고

($\dot{x}(t^*) \equiv 0, t^* = t_1 or\ t_2$) 식(1)(2)를 통해 진동이 없을 부하의 속도 궤적에 대한 조건을 구하면 다음과 같다.

$$\theta_2(t^*) = \theta_1(t^*); \quad w_2(t^*) = w_1(t^*) = 0 \tag{3}$$

여기서 t^*는 t_1또는 t_2이다. 또 식(1)(2)에서

$$\frac{d}{dt}w_2(t) = \frac{K_{12}}{J_2}(\theta_1(t) - \theta_2(t)) \tag{4}$$

이므로 (3)(4)로부터

$$\frac{d}{dt}w_2(t)\Big|_{t=t^*} = \frac{K_{12}}{J_2}(\theta_1(t^*) - \theta_2(t^*)) = 0 \tag{5}$$

를 얻고, 또 (4)식을 미분하여

$$\frac{d^2}{dt^2}w_2(t)\Big|_{t=t^*} = \frac{K_{12}}{J_2}(w_1(t^*) - w_2(t^*)) = 0 \tag{6}$$

을 얻는다. 식(3)(5)(6)으로부터 진동이 발생하지 않는 부하의 위치 궤적을 $\theta_2^d(t)$, 이에 해당하는 부하의 속도 궤적을 $w_2^d(t)$라 하고, 전동기의 위치 궤적을 $\theta_1^d(t)$라 하면 다음을 얻는다.

$$\theta_1^d(t^*) = \theta_2^d(t^*) \tag{7}$$

$$w_2^d(t^*) = \frac{d}{dt}w_2^d(t)\Big|_{t=t^*} = \frac{d^2}{dt^2}w_2^d(t)\Big|_{t=t^*} = 0 \tag{8}$$

따라서 진동이 발생하지 않는 부하의 위치 궤적은 식(7)(8)에 제시된 운동의 시작 시점과 종료 시점에 대한 경계조건을 만족하도록 설정되어야 한다.

3.2 전동기의 속도 궤적 조건

일반적으로 부하의 속도 및 위치는 측정하기가 힘들기 때문에 앞서 구한 부하의 위치 궤적을 측정이 용이한 전동기의 위치 궤적으로 환산할 필요가 있다. 이를 위해 식(4)를 다시 정리하면 다음과 같다.

$$\theta_1(t) = \theta_2(t) + \frac{J_2}{K_{12}}\frac{d^2}{dt^2}\theta_2(t) \tag{9}$$

식(9)는 부하와 전동기의 위치 궤적간의 관계를 나타내는 식으로 부하와 전동기의 위치가 주어진 궤적을 만족하기 위해서는 식(9)가 만족되어야 한다. 따라서 식(9)를 이용하면 부하의 지정된 위치 궤적에 해당하는 전동기의 위치 궤적을 산출할 수 있다. 즉 $\theta_1^d(t)$가 진동이 발생하지 않는 부하의 위치 궤적에 해당하는 전동기의 위치 궤적이라 하면 식(9)를 이용하여 다음과 같이 산출된다.

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

4. 학습 제어에 의한 위치 제어

본 절에서는 앞 절에서 소개된 2관성 공진계의 위치 제어에 대해 반복 학습제어 기법을 적용하는 문제에 대해 논의한다. 반복 학습 제어는, 어떤 주어진 작업이 반복적으로 이루어 질 때, 이전 반복의 오차 정보를 활용하여 다음 반복에서의 제어 성능을 개선하는 방식으로 구성되어 있다[8][9][10]. 이때, 이전 반복의 오차 정보를 어떻게 활용하는가에 따라 반복 학습제어기의 구조가 달라지지만, 본 논문에서는 그 중 널리 사용되고 있는PD-type 학습제어 기법을 고려한다.

$$u_{k+1}(t) = u_k(t) + \Gamma(\dot{e}_k(t) + Re_k(t)) \tag{11}$$

여기서 첨자 k는 반복 횟수를 나타내고, $e(t)$는 원하는 전동기의 위치 궤적($\theta_1^d(t)$)과 실제 전동기의 위치 궤적($\theta_1(t)$) 간의 오차를 나타낸다.

식(11)의 PD-type 학습 제어기의 수렴 조건은

$$\|I - \Gamma CB\| < 1 \tag{12}$$

로 알려져 있다[9]. 이 때, 식(1)(2)로 부터 $CB = 0$이므로 식(11)의 반복 학습 제어 기법은 식(1)(2)의 2관성 공진계의 위치 제어계에 적용이 불가능한 것을 알 수 있다. 이 경우 식(11)의 학습 법칙을 다음과 같이 변형하면 적용이 가능해 진다.

$$u_{k+1}(t) = u_k(t) + \Gamma(\ddot{e}_k(t) + R\dot{e}_k(t)) \tag{13}$$

학습 법칙 식(13)는 식(11)의 오차 신호를 한차례 더 미분한 신호를 사용하는 것으로 구성되어 있다. 이 경우 학습 제어기의 수렴 조건은

$$\|I - \Gamma CAB\| < 1 \tag{14}$$

이며, 식 (1)(2)로부터 $CAB = 1/J_1$이므로 만약 식(1)(2)의 2관성계에 식(13) 반복 학습 제어 법칙을 적용할 경우 학습 제어 법칙을 설계하기위해 필요한 정보는 전동기의 관성 모멘트(J_1)뿐이다. 따라서 다소 모델이 부정확한 2관성 공진계에 대해서도 식(13)의 학습 제어 기법의 적용이 가능하다.

한편, 식(13)의 반복 학습 제어는 한차례 미분을 더 한 까닭에 속도 및 가속도 오차를 이용하여 학습을 처리하므로 위치 오차에 대한 보상이 이루어지지 않는다. 따라서 초기 위치 오차가 존재 할 경우 이에 대한 보상이 필요하다. 이와 같이 위치 오차를 보상하기 위해 본 논문에서는 다음과 같이 위치 오차를 포함하는 학습 제어기를 고려한다.

$$\begin{aligned} u_{k+1}(t) = u_k(t) \\ + \Gamma(\ddot{e}_k(t) + R\dot{e}_k(t) + Qe_k(t)) \end{aligned} \tag{15}$$

식(15)과 같은 학습 제어기의 수렴 조건은 식(13)의 학습 제어기와 같이 식(14)가 된다. 따라서 위치 오차 항으로 인한 수렴 조건의 변화는 없다. 그러나 이 경우 초기 오차 값으로 인해 수렴되는 위치 궤적에 다소 변화가 생긴다. 이를 좀더 구체적으로 다루기 위해 영이 아닌 초기 위치 오차 값에 의해 변화되는 출력 궤적의 양을 $\Delta e(t)$라 하면 $\Delta e(t)$는 다음을 만족한다.[10]

$$\frac{d^2}{dt^2}\Delta e(t) + R\frac{d}{dt}\Delta e(t) + Q\Delta e(t) = 0 \tag{16}$$

식(16)은 $\Delta e(t)$에 관한 미분 방정식이고 $\Delta e(0)$가 영이 아니므로 $\Delta e(t) \not\equiv 0$이다. 한편 이 초기 오차에 의해 변화된 궤적을 $\Delta\theta_1(t)$라 하면

$$\Delta\theta_1(t) = \theta_1^d(t) + \Delta e(t) \tag{17}$$

가 되어 식(10)의 부하의 위치 궤적과의 관계식을 만족 못하게 되므로 부하의 위치 궤적에 변화가 생기게 된다. 이에 따라 변화된 부하의 위치 궤적은 식(7)(8)의 조건을 위배하여 진동이 발생할 수 있다. 이와 같은 문제을 극복하기 위해 본 논문에서는 다음과 같은 학습 제어기를 제안한다.

$$\begin{aligned} u_{k+1}(t) &= u_k(t) \\ &+ \Gamma(\ddot{e}_k(t) + R\dot{e}_k(t) + Q(t)e_k(t)) \end{aligned} \tag{18}$$

제안된 학습 제어 법칙은 위치 오차항의 학습 게인을 시간에 대한 weight 함수 $Q(t)$로 설계하였다. 초기 오차 위치에 의해 변경된 출력 궤적$\Delta e(t)$는 식(16)의 미분 방정식에서 알 수 있듯이 학습 게인 R과 $Q(t)$에 의해 결정되는 데, 변경된 출력 궤적 $\Delta e(t)$가 진동이 발생하지 않을 경계 조건(7)(8)을 만족하도록 $Q(t)$를 설정하도록 한다. 한편 식(7)(8)은 시작 시점과 종료 시점에서의 조건을 나타내므로 이 시점에서의 초기 위치오차에 의한 효과를 없애기 위해서 $Q(t)$는 다음과 같이 설정하도록 한다.

$$Q(t^*) = 0 \tag{19}$$

식(19)에서 시작 시점과 종료 시점에서 위치 오차에 대한 학습 제어 게인을 0으로 함으로 이들 시점에서는 위치 오차에 의한 출력 궤적의 변화가 없다. 따라서 초기 위치 오차에 의한 진동 현상을 제거하는 하나의 방법이 된다.

5. 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 (kg m^2)
J_2=0.004 (kg m^2)
K_{12}=1.2938 (Nm/rad)

이 2 관성 공진계의 부하의 회전 각도를 0[rad]에서 5[rad]이 되도록 하되 settling time이 3.0초 이내가 되게 하도록 하고자 한다. 이의 조건과 (7)(8)의 조건식을 고려하여 부하의 위치 각도에 대한 원하는 위치 궤적 생성하면 다음과 같다.

$$\theta_2^d(t) = \begin{cases} A(t) & 0 \le t \le 1 \\ 1.25 + 2.5(t-1) & 1 < t \le 2 \\ B(t) & 2 < t \le 3 \\ 5 & 3 < t \le 4 \end{cases} \tag{20}$$

여기서

$$\begin{aligned} A(t) &= 6.25t^4 - 7.5t^5 + 2.5t^6 \\ B(t) &= 5 - A(3-t) \end{aligned} \tag{21}$$

이다. 식(20)의 부하의 위치 궤적에 대응하는 전동기의 원하는 위치 궤적은 식(10)을 통하여 구했다. 그림2는 이렇게 구한 부하의 위치 궤적과 전동기의 위치 궤적을 보여주고 있다.

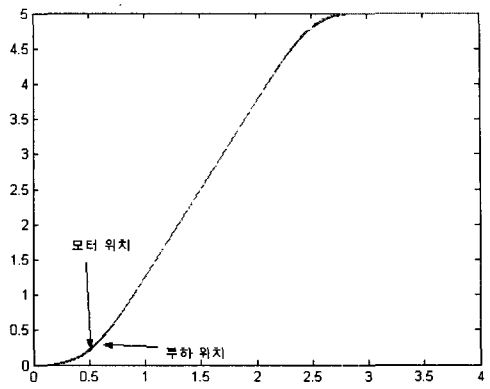

그림 2. 부하 및 전동기에 대한 원하는 위치 궤적
Fig. 2. Desired position trajectory for motor and load

비교를 위해 이 위치 궤적에 식(13),(15),(18)의 세가지 학습 제어기를 적용하였다. 수렴 조건등을 고려하려 세 경우 모두 $\Gamma = 0.0112$를 적용하였고. $R, Q, Q(t)$는 다음과 같이 적용하였다.

Case I [식(13)] : $R = -2.0$
Case II [식(15)] : $R = -6.0 \quad Q = 9.0$
Case III[식(18)] : $R = -6.0 \quad Q(t) = 12t(3-t)$

그림 3.은 초기 위치 오차 0.1인 경우 세가지 학습기법에 의한 위치 제어 결과를 보여준다. 위치 정보를 활용하지 않는 Case I의 경우 위치 오차 정보를 활용하지 않는 까닭에 초기 위치 오차 값이 제거되지 않고 그대로 유지됨을 알 수 있다. 이와 달리 Case II, III에서는 위치 오차 정보를 적절히 이용하여 초기 위치 오차를 효과적으로 제거하고 있음을 알 수 있다. 특히 운동의 종료 시점인 3초 이후에는 원하는 위치 궤적과 일치됨을 알 수 있다.

그림 4.은 Case II와 III에 대해 속도 궤적을 보여주고 있다. Case II의 경우 초기 위치 오차를 제거하기 위한 궤적의 변경으로 인해 속도 궤적에 진동이 발생하고 있음을 보이고 있으나 Case III는 진동 없이 초기 위치 오차를 원활히 제거하면서 제어가 됨을 보여준다.

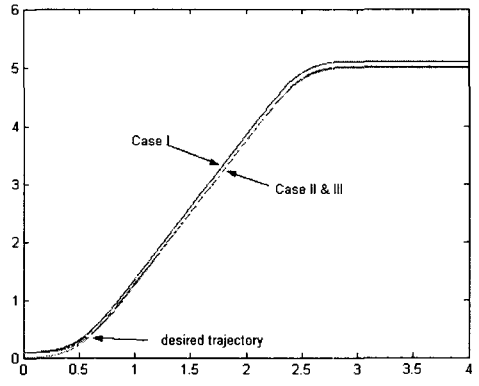

그림 3. 세가지 비교 대상에 대한 위치 궤적
Fig. 3. Position Trajectories of Case I,II and III

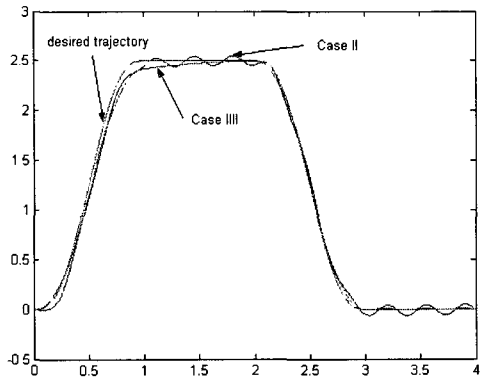

그림 4. 세가지 비교 대상에 대한 속도 궤적
Fig. 4. Velocity Trajectories of Case II and III

6. 결 론

본 논문에서는 초기 위치 오차를 갖는 2관성 공진계의 위치 제어를 위해 반복 학습 제어 기법을 적용하는 새로운 방식을 제안하였다. 제안된 방식은 진동이 발생하지 않는 부하의 위치 궤적을 생성하고 이에 대한 완벽한 추종 성능을 위해 반복 학습 제어를 적용하는 방식으로 구성되어 있다. 반복 학습 제어는 제어 대상 시스템에 대한 모델이 다소 부정확하더라도 완벽 추종 성능을 보장하므로 제안된 방식은 주어진 모델이 다소 부정확하더라도 효과적인 진동 억제 제어 방식이 될 수 있다. 한편 2관성 공진계의 경우 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. 또한 초기 위치 오차를 보상하기 위해 위치 오차항을 포함하는 학습 제어기를 제안하였고 이 초기 위치 오차에 의한 진동 효과를 억제하기 위해 학습 게인을 시간에 대한 weight 함수를 이용하여 구현하였다. [1]의 2관성 공진 시스템을 대상으로 적용한 결과 기존의 학습 제어 방법에 비해 진동 없이 초기 위치 오차를 효과적으로 제거함을 확인하였다. 제안된 방식은 모델에 대한 의존도가 적으므로 모델이 부정확하더라도 진동 없이 정확하게 부하의 회전 각도를 제어하는 것이 가능하다. 또한 주어진 회전 각도에 대한 궤적을 변경함에 따라 고속의 위치 제어도 가능하다.

참 고 문 헌

[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] H. Kawaharada, I. Godler, T. Ninomiya and H. Honda, "Vibration Suppression Control in 2-inertia System by Using Estimated Torsion Torque", IECON 2000. 26th Annual Conference of the IEEE, vol. 3, pp.2219-2224, 2000

[3] 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.

[4] 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

[5] S. Hashimoto, K. Hara, H. Funato and K. Kamiyama, "AR-Based Identification and Control Approach in Vibration Suppression", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol.37, no.3, May/June 2001 pp.806-811.

[6] H. S. Lee, "Study on Vibration Suppression of 2-Mass Resonant System Using Iterative Learning Control," in *대한전자공학회 하계학술대회논문집* p. 79-82, 20

[7] H. S. Lee and S. Moon, "반복 학습 제어를 이용한 2관성 공진계의 위치 제어에 관한 연구," in *한국지능및퍼지시스템학회 추계학술대회논문집* p. 137-140

[8] 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.

[9] H. S. Lee and Z. Bien, "Design Issues on Robustness and convergence of a iterative learnig controller," in *Intelligent Automation and Soft Computing*, vol. 8, no. 2, pp 95-106, 2002.

[10] Kwang-Hyun Park, Zeungnam Bien and Dong-Hwan Hwang, "A study on the robustness of a PID-type iterative learning controller against initial state error", *International Journal of Systems Science*, vol. 30, no. 1, pp. 49-59, 1999.

저 자 소 개

이학성(Hak-Sung Lee)
1989년 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과졸업(학사)
1991년 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과졸업(공학 석사)
1996년 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과졸업(공학 석사)
1996년~1998년 : LG 종합 기술원.
1998년~2000년 : LG 이노텍.
2000년~현재 세종대학교 전자공학과 조교수

관심분야 : 학습 제어, 지능 제어, 로봇 제어
Phone : 02-3408-3732
Fax : 02-3408-3329
E-mail : hslee@sejong.ac.kr

문승빈(Seungbin Moon)
1985년 : 명지대학교 전자공학과 졸업(학사)
1988년 : University of Michigan, EECS 졸업(석사),
1993년 : Purdue University, EE 졸업 (박사)
1993년~1999년 : 삼성전자
1999년~현재 세종대학교, 컴퓨터 공학과 조교수

관심분야 : 실시간 임베디드 시스템, 로보틱스, 컴퓨터 비젼
Phone : 02-3408-3243
Fax : 02-497-6773
E-mail : sbmoon@sejong.ac.kr