

논문 2014-51-1-25

벤치마크 로봇의 동적 마찰 보상을 위한 적응 제어기 설계 (Design of Adaptive Controller to Compensate Dynamic Friction for a Benchmark Robot)

김 인 혁*, 조 경 훈*, 손 영 익**, 김 필 준***

(In-Hyuk Kim, Kyoung-Hoon Cho, Young Ik Son[©], and Pil-Jun Kim)

요 약

로봇 시스템에 작용하는 마찰력은 비선형 형태이며 특히 저속에서의 정밀 제어를 어렵게 만든다. 본 논문에서는 로봇 연구에서 자주 활용되고 있는 벤치마크 로봇 시스템의 단축 모델에 대한 동적 마찰 보상 문제를 다룬다. 마찰 모델은 동적 특성 및 다양한 효과를 나타낼 수 있도록 비선형 동적 모델인 LuGre 모델을 고려한다. 본 논문에서 제안하는 제어기는 두 부분으로 구성된다. 동적 마찰의 추정 및 보상을 위해 Dual 관측기 기반의 적응 제어기를 사용한다. 마찰 추정 오차 및 나머지 외란을 보상하기 위해 PI 관측기를 추가로 설계한다. 모의실험을 통해 비선형 동적 마찰이 벤치마크 로봇 시스템의 제어 성능에 미치는 영향을 확인하고 제안된 제어기를 사용함으로써 동적 마찰에 대한 제어 성능이 향상됨을 보인다.

Abstract

Friction force on robot systems is highly nonlinear and especially disturbs precise control of the robots at low speed. This paper deals with the dynamic friction compensation problem of a well-known one-link benchmark robot system. We consider the LuGre model because the model can successfully represent dynamic characteristics and various effects of friction phenomenon. The proposed controller is constructed as two parts. An adaptive controller based on dual observers is used to estimate and compensate the dynamic friction. In order to attenuate the friction estimation error and other disturbances, PI observer is additionally designed. Through the computer simulations with the benchmark system, this paper first examines the effects of nonlinear dynamic friction on the control performance of the benchmark robot system. Next, it is shown that the control performance against the dynamic friction is improved by using the proposed controller.

Keywords : Benchmark Robot, Dynamic Friction, Friction Compensation, Adaptive Control, PI Observer

I. 서 론

로봇 구동기, 감속기, 관절 연결 구조에서 발생하는

마찰은 비선형성을 가지며 제어 문제를 어렵게 한다. 특히, 저속에서 로봇 시스템의 동적 거동을 지배하여 리밋 사이클(Limit Cycle) 및 스틱 슬립(Stick Slip) 운동을 발생시키므로 제어 성능을 저하시킨다. 마찰의 이러한 특성으로 인해 정밀 부품 조립, 로봇 수술에 적용되는 미세 조작(Micro-manipulation) 로봇과 저속으로 고중량 물체를 운반하는 로봇에 걸쳐 로봇 시스템의 힘/위치 정밀 제어가 필요한 분야에서 마찰 보상 문제가 매우 중요하게 다루어지고 있다^[1~5].

한편, 마찰 보상을 위해 PID 형태의 높은 게인(high gain)을 사용하는 제어기들이 제안되었지만 측정 잡음

* 정회원, ** 정회원, 명지대학교 전기공학과
(Dept. of Electrical Eng., Myongji University)

*** 정회원, 현대중공업 엔진기계연구소
(Hyundai Heavy Industries Co.,Ltd)

© Corresponding Author(E-mail: sonyi@mju.ac.kr)

※ 본 논문은 2013년 정부(지식경제부)의 재원으로 현대중공업(주)의 지원을 받아 수행된 연구임
(10033414).

접수일자: 2013년9월16일, 수정완료일: 2014년1월10일

및 리밋 사이클의 영향으로 인해 적용 분야에 제한을 갖는다.^[6] 마찰을 증가적인 외란으로 보고 외란 관측기로 추정하여 보상하는 방법을 고려할 수 있으나,^[7,8] 동특성을 갖는 마찰의 경우 외란 관측기로 추정하기 위해서는 높은 계인을 요구하게 된다. 이로 인한 추가적인 문제를 발생시킬 수 있으므로 적절한 마찰 보상을 위해서는 마찰 모델에 근거한 보상 방법이 필요하다.

마찰이 제어 시스템에 미치는 영향을 분석하기 위해 다양한 마찰 모델이 제시되었다. 그 중 마찰의 동적 특성을 고려함으로써 마찰의 다양한 효과를 표현 할 수 있는 LuGre 모델^[11]이 마찰 모델링 및 마찰 보상 제어에 많이 적용되고 있다.

마찰 보상을 위해 LuGre 모델을 바탕으로 적응 제어 기법을 적용한 연구 결과들 중에서 논문^[9]에서는 LuGre 모델에 기반을 둔 Dual 관측기를 사용하여 마찰을 추정하고 마찰 파라미터 불확실성을 적응 제어기로 완화하였다. 이 연구 결과에서는 마찰외의 다른 외란은 고려하지 않고 있어 실제 문제에 적용될 때 한계가 있다. 논문^[10]에서는 AC 서보 전동기의 마찰, 관성 및 부하의 불확실성을 보상하기 위한 제어기 설계 연구가 진행되었다. Dual 관측기^[9]기반 적응 제어기로 마찰을 보상하고 적분형 역진(backstepping)기법을 사용하여 다른 불확실성에 강인한 제어기를 구성하였다. 이와 유사한 형태로 논문^[11]에서는 마찰과 크기가 알려진 외란을 고려하였고 그 영향을 줄이기 위한 방법으로 적응 강인 제어기를 사용하였다. 적응 제어 부분은 Dual 관측기^[9]를 기초로 하였으며 강인 제어 부분은 외란의 크기(L_∞ -norm)를 고려하여 설계되었다. 논문^[6]에서는 마찰 상태 추정을 위해 슬라이딩 모드 관측기를 설계하고 다른 외란은 적응 제어기로 완화하는 방법을 제안하였다.

본 논문에서는 벤치마크 로봇^[12]의 단축 모델을 대상으로 비선형 동적 마찰과 미지 외란의 작용을 억제할 수 있는 정밀한 위치 제어기를 설계한다. 제안하는 제어기는 마찰 모델을 기반으로 추정한 마찰과 외란 관측기로 추정한 외란을 함께 보상하는 형태로 구성된다.

제안하는 제어기는 앞선 연구와 달리 시스템에 존재하는 외란을 두 부분으로 나누어 생각하고 제어기를 설계한다. 먼저 첫 번째 외란 요소인 마찰을 추정하여 먼저 보상하고 두 번째 외란 요소인 마찰 추정 오차 및 나머지 외란을 보상한다. 마찰 추정에는 적응 제어기^[11]가 사용되며 마찰 추정 오차 및 나머지 외란 보상을 위

해 PI 관측기가 사용된다^[7,8]. 이러한 구조를 가짐으로써 제안하는 방법은 낮은 계인으로 제어기를 설계할 수 있다는 장점이 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장 1절에서 벤치마크 로봇 시스템의 단축 모델과 비선형 마찰 모델을 소개하고, II장 2절에서 제안하는 적응 제어기와 PI 관측기를 결합한 제어기를 설계한다. III장 1절의 첫 번째 모의실험을 통해 비선형 동적 마찰이 기존의 벤치마크 로봇 시스템에 미치는 영향을 확인하고 III장 2절의 두 번째 모의실험을 통해 제안하는 제어기의 제어 성능을 확인한다.

II. 본 론

1. 로봇 시스템과 비선형 마찰

본 논문에서는 벤치마크 로봇 시스템^[12]에 대한 비선형 동적 마찰 보상 문제를 다룬다. 연구의 초기 단계로 단축 로봇을 대상으로 한다. 시스템의 상태 변수와 제어 입력은 아래와 같이 정의한다.

$$q = \begin{bmatrix} q_a \\ q_m/n \end{bmatrix}, u = \begin{bmatrix} u_f \\ (u_m + u_d)n \end{bmatrix} \quad (1)$$

위 식에서 q_a 는 링크의 각도, q_m 은 모터의 각도, n 은 기어 비이며, u_f 는 외력, u_m 은 모터 토크, u_d 는 토크 리플이다. 동적 마찰에 의한 성능 변화를 파악하기 위해서 토크 리플 u_d 는 고려하지 않는다.

식 (1)의 정의에 따라 머니플레이터의 동역학은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$u = M \ddot{q} + G(q) + D \dot{q} + \tau_s(q) + F, \quad (2)$$

$$M = \begin{bmatrix} j_a + m_a \xi_a^2 & 0 \\ 0 & j_m n^2 \end{bmatrix}, G(q) = \begin{bmatrix} -g m_a \xi_a \sin(q_a) \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$D = \begin{bmatrix} b & -b \\ -b & b \end{bmatrix}, \tau_s(q) = \begin{bmatrix} \overline{\tau}_s(\Delta_q) \\ \overline{\tau}_s(-\Delta_q) \end{bmatrix}, \Delta_q = q_a - q_m/n,$$

$$\overline{\tau}_s(\Delta_q) = \begin{cases} k_1 \Delta_q + k_3 \Delta_q^3, & |\Delta_q| \leq \psi \\ \text{sgn}(\Delta_q)(m_0 + m_1(|\Delta_q| - \psi)), & |\Delta_q| > \psi \end{cases},$$

$$k_1 = k_l, k_3 = (k_h - k_l)/(3\psi^2),$$

$$m_0 = k_1 \psi + k_3 \psi^3, m_1 = k_h$$

이다.

위 식에서 M 은 관성 행렬, $G(q)$ 는 중력 벡터이다.

j_a, j_m 은 각각 모터와 링크의 관성 모멘트이고 m_a 는 링크 질량, ξ_a 는 링크 질량 중심, g 는 중력 가속도이다. 행렬 D 와 벡터 $\tau_s(q)$ 는 기어에서 작용하는 마찰과 비선형 강성을 나타낸다. 마찰은 마찰 계수 b 로 결정되고 비선형 강성은 최대 강성 k_h , 최소 강성 k_l , 전환점 ψ 로 결정된다. F 는 구동기의 비선형 마찰이며 참고 문헌 [12]에서는 비선형 정적 마찰 모델을 사용하였다.

본 논문에서는 보다 다양한 마찰 현상을 고려하기 위해 논문[12]의 정적 모델 대신 마찰의 동적 특성을 포함하고 있는 LuGre 마찰 모델^[1]을 적용한다. 동적 특성을 고려한 마찰 모델은 아래 식 (3)-(5)로 표현된다.

$$F = \sigma_0 z + \sigma_1 \frac{dz}{dt} + \sigma_2 \dot{q}_m, \quad (3)$$

$$\frac{dz}{dt} = \dot{q}_m - \frac{|\dot{q}_m|}{g(\dot{q}_m)} z, \quad (4)$$

$$\sigma_0 g(\dot{q}_m) = F_c + (F_s - F_c) e^{-(\dot{q}_m/v_s)^2}. \quad (5)$$

위 식에서 z 는 마찰을 발생시키는 내부 상태이며 측정이 불가능하다. $\sigma_0, \sigma_1, \sigma_2$ 는 강성(Stiffness), 감쇠 지수(Damping Factor), 점성 마찰 계수를 각각 나타내고, v_s 는 Stribeck 속도, F_c 는 쿨롬 마찰력의 크기, F_s 는 정적 마찰력(Static Friction)의 크기이다.

LuGre 모델의 정상 상태는 식 (6)으로 표현된다.

$$F_{ss} = \left(F_c + (F_s - F_c) e^{-(\dot{q}_m/v_s)^2} \right) \text{sgn}(\dot{q}_m) + \sigma_2 \dot{q}_m \quad (6)$$

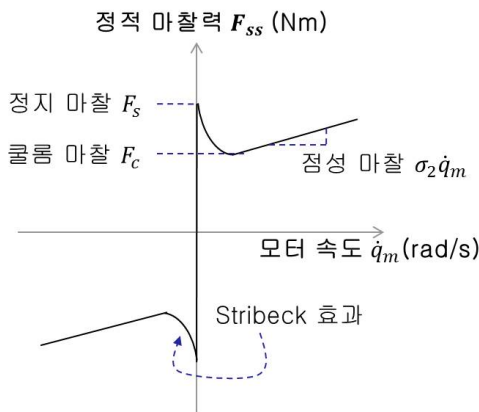


그림 1. 정적 마찰 곡선 (속도-마찰)

Fig. 1. Static Friction Curve (Velocity-Friction).

위 식은 속도에 대한 함수이며 그림 1과 같은 형태이다. 각 파라미터는 참고 문헌^[12]의 정적 마찰 데이터를 이용하여 선정한다.

2. 제안하는 제어기

논문에서 제안하는 모터 토크 u_m 을 계산하기 위해 모터 축에 대한 식을 구한다. 식 (2)의 시스템에서 비선형 마찰 F 와 관성 행렬 M 의 모터의 관성 j_m 을 제외한 중력벡터 $G(q)$, 기어의 마찰 $D\dot{q}$, 스프링 토크 $\tau_s(q)$ 항과 링크에 대한 영향을 외란 Δ 으로 정의하고 식 (3)-(4)의 동적 마찰 모델을 적용하면 아래 식을 얻을 수 있다.

$$j_m \frac{d\dot{q}_m}{dt} = u_m - \sigma_0 z + \sigma_1 \frac{|\dot{q}_m|}{g(\dot{q}_m)} z - (\sigma_1 + \sigma_2) \dot{q}_m + \Delta \quad (7)$$

위 식을 간단히 표현하기 위해 새로운 파라미터 $\theta = [\theta_1 \theta_2 \theta_3 \theta_4]^T$ 를 아래와 같이 정의한다.

$$\theta_1 = j_m, \theta_2 = \sigma_0, \theta_3 = \sigma_1, \theta_4 = \sigma_1 + \sigma_2$$

새로운 변수 θ 에 따라 식 (7)은 아래와 같이 표현되고 이 식에 대해 제어기를 설계한다. 단, $\theta_i > 0$ 이다.

$$\theta_1 \frac{d\dot{q}_m}{dt} = u_m - \theta_2 z + \theta_3 \frac{|\dot{q}_m|}{g(\dot{q}_m)} z - \theta_4 \dot{q}_m + \Delta \quad (8)$$

제안하는 제어기는 동적 마찰 보상을 위한 적응 제어기와 마찰 추정 오차 및 나머지 외란을 보상하기 위한 PI 관측기로 구성된다. 제어기의 구조는 그림 2와 같다.

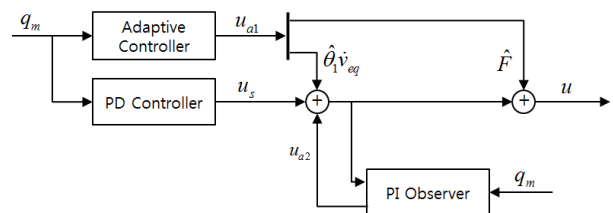


그림 2. 제안하는 제어기 구조

Fig. 2. Structure of Proposed Controller.

가. 마찰 보상을 위한 적응 제어기 설계

모터의 동적 마찰을 추정하여 보상하기 위해 참고 문헌^[11]의 적응 제어기를 활용한다 (그림 2의 u_{a1} 와 u_s).

외란 Δ 는 다음 단계에서 보상하기 위해 본 절에서는 0인 경우를 고려한다.

기준 입력 q_{ref} 에 대한 오차 $e_1 = q_m - q_{ref}$ 로 정의하고 오차변수 e_2 는 식 (9)와 같이 정의한다. 적응 제어기는 $e_2 \rightarrow 0$ 이 되도록 설계한다. 단, $v_{eq} = \dot{q}_{ref} - ke_1$.

$$e_2 = \dot{e}_1 + ke_1 = \dot{q}_m - v_{eq}. \quad (9)$$

본 절에서 설계하는 적응 제어기는 식 (10)의 PD 제어기 u_s 와 식 (11)의 추정 마찰 \hat{F} 을 포함한 u_{a1} 으로 구성된다.

$$u_s = -k_s e_2, \quad (10)$$

$$u_{a1} = \hat{\theta}_1 \dot{v}_{eq} + \hat{F}$$

$$\hat{F} = \hat{\theta}_2 \hat{z}_0 - \hat{\theta}_3 \frac{|\dot{q}_m|}{g(\dot{q}_m)} \hat{z}_1 + \hat{\theta}_4 \dot{q}_m \quad (11)$$

위 식에서 마찰 추정 \hat{F} 에 사용된 변수 \hat{z}_0, \hat{z}_1 는 상태 관측기에서 추정된 변수이며 식 (12)-(13)의 Dual 관측기 식을 사용하여 설계한다.

$$\frac{d\hat{z}_0}{dt} = \dot{q}_m - \frac{|\dot{q}_m|}{g(\dot{q}_m)} \hat{z}_0 - \gamma_0 e_2, \quad \gamma_0 > 0 \quad (12)$$

$$\frac{d\hat{z}_1}{dt} = \dot{q}_m - \frac{|\dot{q}_m|}{g(\dot{q}_m)} \hat{z}_1 + \gamma_1 \frac{|\dot{q}_m|}{g(\dot{q}_m)} e_2, \quad \gamma_1 > 0 \quad (13)$$

식 (11)의 파라미터 추정을 위한 update law는 아래 식과 같이 설계한다.

$$\dot{\hat{\theta}} = \Gamma \varphi e_2, \quad (14)$$

$$\varphi = [-\dot{v}_{eq}, -\hat{z}_0, \frac{|\dot{q}_m|}{g(\dot{q}_m)} \hat{z}_1, -\dot{q}_m]^T. \quad (15)$$

단, Γ 는 update law의 가중 행렬이며 양의 값을 갖는 원소로 이루어진 대각 행렬이다.

제어 입력 u_s, u_{a1} 을 사용한 시스템의 안정도 확인을 위해 식 (16)의 Lyapunov 함수를 사용한다.

$$V_a = \frac{1}{2} \theta_1 e_2^2 + \frac{1}{2\gamma_0} \theta_2 \hat{z}_0^2 + \frac{1}{2\gamma_1} \theta_3 \hat{z}_1^2 + \frac{1}{2} \tilde{\theta}^T \Gamma^{-1} \tilde{\theta} \quad (16)$$

함수 V_a 를 시간에 대해 미분하고 식 (8)에 식 (10)-(11)의 입력 $u_m = u_s + u_{a1}$ 을 대입한 식을 사용하면 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{V}_a = -k_s e_2^2 - \frac{\theta_2}{\gamma_0} \frac{|\dot{q}_m|}{g(\dot{q}_m)} \hat{z}_0^2 - \frac{\theta_3}{\gamma_1} \frac{|\dot{q}_m|}{g(\dot{q}_m)} \hat{z}_1^2 \leq -k_s e_2^2 \quad (17)$$

위 식으로부터 $\dot{V}_a \leq 0$ 이고, Barbalat's lemma를 사용한 해석을 통해 $\lim_{t \rightarrow \infty} e_2(t) = 0$ 임을 보일 수 있다. 이를 통해 $\lim_{t \rightarrow \infty} e_1(t) = 0$ 임을 알 수 있다.

나. 마찰 추정 오차 및 외란 보상을 위한 PI 관측기

본 절에서는 마찰 추정 오차($\hat{F} - F$)와 나머지 외란(Δ)을 보상하기 위한 PI 관측기를 설계한다. 관측기가 추정하는 외란을 식 (18)로 정의한다.

$$d = \hat{F} - F + \Delta \quad (18)$$

PI 관측기 설계를 위해 추정할 외란은 충분히 느린 경우를 가정하고 상수($\dot{d} = 0$)로 둔다^[7]. PI 관측기의 상태변수 \hat{x} 는 식 (19)와 같이 정의하며 식 (20)과 같이 설계한다.

$$\hat{x} = [\hat{q}_m \quad \hat{\dot{q}}_m \quad \hat{d}]^T, \quad (19)$$

$$\dot{\hat{x}} = A_o \hat{x} + B_o u_o + L_o (q_m - C_o \hat{x}), \quad (20)$$

$$A_o = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \bar{\theta}_1^{-1} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, B_o = \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{\theta}_1^{-1} \\ 0 \end{bmatrix}, C_o^T = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, L_o = \begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \\ L_3 \end{bmatrix}.$$

위 식에서 $\bar{\theta}_1$ 은 공칭 값이고 관측기 입력은 $u_o = u_s + \hat{\theta}_1 v_{eq} - \hat{d}$ 이며, 계인 L_o 는 아래의 조건을 만족하도록 설계한다.

$$Re\{\lambda(A_o - L_o C_o)\} < 0. \quad (21)$$

결국 본 논문에서 제안하는 제어기는 앞 절에서 설계한 적응 제어기와 PI 관측기가 결합된 식 (22)와 같다.

$$u_m = u_s + u_{a1} + u_{a2}, \quad u_{a2} = -\hat{d} \quad (22)$$

III. 모의 실험

1. 동적 마찰의 영향

제안하는 제어기의 성능 확인에 앞서 동적 마찰이 벤치마크 로봇 시스템에 미치는 영향을 확인한다. 기존의 정적 마찰을 보상하기 위해 설계된 PID 제어기^[12]를 LuGre 마찰 모델을 포함한 시스템에 적용한다. 제어 대상 시스템의 파라미터와 PID 제어기 게인은 참고 문헌^[12]와 동일하게 선정하였다. 실험에서 사용한 마찰 파라미터들은 표 1과 같다.

표 1. 동적 마찰 파라미터
Table 1. Parameters of Dynamic Friction.

| | |
|-------------|------------------------------------|
| 정지 마찰 | $F_s = 1.5[\text{Nm}]$ |
| 쿨롬 마찰 | $F_c = 0.75[\text{Nm}]$ |
| Stribeck 속도 | $v_s = 4.0[\text{rad/s}]$ |
| 섬모의 강성 | $\sigma_0 = 4.0[\text{Nm/rad}]$ |
| 감쇠 계수 | $\sigma_1 = 1.0[\text{Nms/rad}]$ |
| 점성마찰계수 | $\sigma_2 = 0.006[\text{Nms/rad}]$ |

시스템의 상태 q_m, \dot{q}_m, z 의 초기 추정치는 모두 0으로 설정하고, 위치 지령 q_{ref} 는 논문^[11]과 유사한 식 (23)을 사용하였으며 모의실험 시간은 25초이다.

$$q_{ref} = 500 \tan^{-1} \{0.5774 \sin(0.5t) \times (1 - e^{-0.005t^3})\} \quad (23)$$

그림 3은 제어 오차 e_1 이며 동적 마찰이 PID 제어기^[12]를 사용한 벤치마크 로봇 시스템의 제어 성능에 미치는 영향을 나타낸다. 마찰에 대한 영향을 확인하기 위해서 외력 u_f 는 고려하지 않았다. 그림 3으로부터 동적 마찰이 PID 제어기의 제어 성능에 미치는 영향을 확인할 수 있다. 그림에서 오차 e_1 의 2-노름을 구해보면 각각 4.97(Case1)과 5.42(Case2)이다. 이를 통해 본 논문에서 제안하는 추가적인 마찰 보상 방법이 필요함을 알 수 있다.

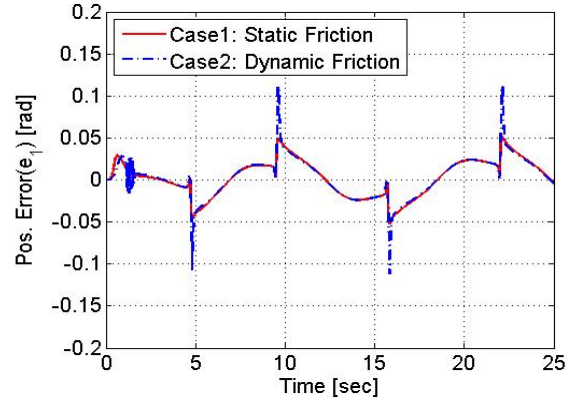


그림 3. 동적 마찰이 제어 성능에 미치는 영향
Fig. 3. Effect of Dynamic Friction on Control Performance.

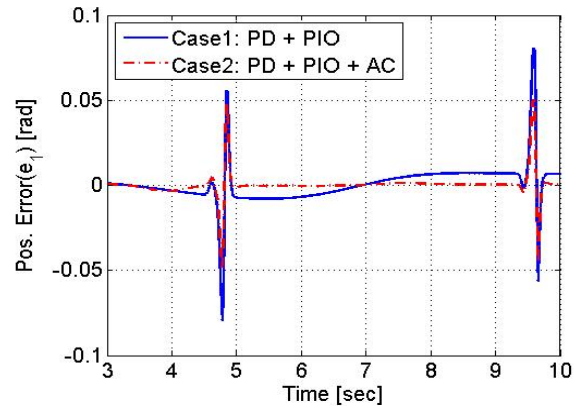


그림 4. 동적 마찰에 대한 제어기 성능 비교
Fig. 4. Comparison of Controller Performance under Dynamic Friction.

2. 마찰 보상 모의실험

제안된 제어 알고리즘의 성능을 확인하기 위해 표 2와 같이 적응 제어기, PI 관측기 게인 및 초기 파라미터 추정치를 선정하였다.

그림 4는 동적 마찰 모델이 존재할 경우 마찰 보상을

표 2. 설계된 제어기 파라미터
Table 2. Determined Controller Parameters.

| | |
|-------------|---|
| 초기 추정치 | $\hat{\theta}(0) = [0.004, 2, 0.1, 0.1]^T$ |
| 가중 행렬 | $\Gamma = \text{diag}[0.005, 5, 0.005, 0.005]$ |
| Dual 관측기 게인 | $\gamma_0 = \gamma_1 = 0.001$ |
| PI 관측기 극점 | $\lambda(A_o - L_o C_o) = [-100, -100, -100]^T$ |
| 제어기 게인 | $k = 60, k_s = 0.6$ |

위해 PI 관측기를 추가로 사용한 PD 제어기 + PI 관측기 경우(Case1)와 제안하는 제어기를 사용한 경우(Case2)의 출력 오차 e_1 을 비교한 결과이다. 그림에서 오차의 2-노름을 구해보면 각각 2.25(Case1)와 1.32(Case2)이다. 이 결과로부터 제안하는 제어기의 성능 개선을 확인할 수 있다.

IV. 결 론

본 논문은 로봇 시스템에 작용하는 비선형 동적 마찰이 제어 성능에 미치는 영향을 확인하기 위해 벤치마크 로봇 시스템의 단축 모델에 대한 모의실험을 진행하였다. 기존의 정적 마찰 모델 대신 LuGre 마찰 모델을 적용하여 추가적인 마찰 보상이 필요함을 확인하였다.

비선형 동적 마찰 및 추가적인 외란에 의한 성능 저하 문제를 개선하기 위해 적응 제어기와 PI 관측기를 기반으로 하는 제어기를 제안하였으며, 모의실험을 통해 제안하는 제어기의 성능 개선 효과를 확인하였다. 본 논문에서 제안하는 제어기는 다양한 마찰 현상을 고려할 수 있어 마찰이 지배적인 저속 구간에서 로봇 시스템의 제어 성능을 향상시킬 것으로 기대한다.

REFERENCES

[1] C. Canudas de Wit, H. Olsson, K.J.Åström and P. Lischinsky, "A New Model for Control of Systems with Friction", *IEEE Trans. on Automatic Control*, vol.40, no. 3, pp. 419-425, 1995.

[2] G. Morel, K. Iagnemma and S. Dubowsky, "The Precise Control of Manipulators with High Joint-friction Using Base Force/Torque Sensing", *Automatica*, vol. 36, no. 7, pp. 931-941, 2000.

[3] P.S. Gandhi, F.H. Ghorbel, and J. Dabney, "Modeling, Identification, and Compensation of Friction in Harmonic Drives", *Proc. of the 41st IEEE Conf. on Decision and Control*, 2002

[4] M. Jin, S. H. Kang and P. H. Chang, "Robust Compliant Motion Control of Robot with Nonlinear Friction Using Time-delay Estimation", *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 55, no. 1, pp. 258-269, 2008.

[5] 김두규, 김자영, 이지홍, 최동걸, 권인소, "마찰계수의 비접촉 추정을 위한 영상정보 활용방법", *전자공*

학회 논문지, vol. 47, SP 편, no. 4, pp. 28-34, July, 2010.

[6] W. Xie, "Sliding Mode Observer Based Adaptive Control for Servo Actuator with Friction", *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 54, no. 3, pp. 1517-1527, 2007.

[7] S. Soffker, T.J. Yu, P.C. Muller, "State Estimation of Dynamical Systems with Non-linearities by Using Proportional Integral Observer", *Int. J. Systems Sci.*, vol. 26, no. 9, pp. 1571-1582, 1995.

[8] 김성중, 손영익, 정유석, "단상 DC/AC 인버터 시스템의 부하변동을 고려한 외란 관측기 기반 제어기", *전자공학회 논문지*, vol. 44, SC 편, no. 4, pp. 21-26, July, 2007.

[9] Y. Tan and I. Kanellakopoulos, "Adaptive Non-linear Friction Compensation with Parametric Uncertainties", *Proc. of the American Control Conference*, San Diego, California, 1999.

[10] Y. Tan, J. Chang and H. Tan, "Adaptive Backstepping Control and Friction Compensation for AC Servo with Inertia and Load Uncertainties", *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 50, no. 5, pp. 944-952, 2003.

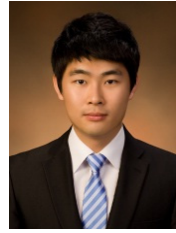
[11] L. Xu and B. Yao, "Adaptive Robust Control of Mechanical Systems with Non-linear Dynamic Friction Compensation", *Int. J. of Control*, vol. 81, no. 2, pp. 167-176, 2008.

[12] S. Moberg, J. Öhr and S. Gunnarsson, "A Benchmark Problem for Robust control of a Multivariable Nonlinear Flexible Manipulator", *Proc. of 17th IFAC World Congress*, Seoul, Korea, 2008.

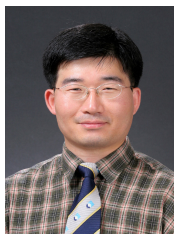
저 자 소 개



김 인 혁(정회원)
 2009년 명지대학교 전기공학과
 학사 졸업.
 2011년 동 대학원 전기공학과
 석사 졸업.
 2011년~2012년 DGIST 연구원.
 2013년~현재 명지대학교
 전기공학과 박사 과정.
 <주관심분야 : 강인 제어 이론, 로봇 제어, 전력
 변환기 제어, 마이크로프로세서 응용>



조 경 훈(정회원)
 2012년 명지대학교 전기공학과
 학사 졸업.
 2014년 동 대학원 전기공학과
 석사 졸업 예정.
 <주관심분야 : 전기기기 제어, 마이크로프로세서
 응용>



손 영 익(정회원)
 1995년 서울대학교 전기공학과
 학사 졸업.
 2002년 동 대학원 전기.컴퓨터
 공학부 박사 졸업.
 2003년~현재 명지대학교
 전기공학과 교수.
 2007년~2008년 Cornell University Visiting
 Scholar.
 <주관심분야 : 강인 제어 기법, 산업용 로봇 및
 전기 자동차 모터 제어>



김 필 준(정회원)
 2003년 인하대학교 항공우주공학
 과 학사 졸업.
 2007년 서울대학교 기계항공공학
 부 석사 졸업.
 2003년~현재 현대중공업(주)
 엔진기계연구소 선임연구원.
 <주관심분야 : 산업용 및 클린룸용 로봇 제어,
 시스템 파라미터 추정>