슬라이딩 표면을 이용한 로봇 매니퓰레이터의 강건한 적응 마찰 제어

논 문
60-11-21

A Robust Adaptive Friction Control of Robot Manipulators using Sliding Surface

배 준 경*
(Jun-Kyung Bae)

Abstract - In this paper, a robust adaptive controller is proposed for trajectory tracking of robot manipulators with the unknown friction coefficient and bounded disturbance. A new adaptive control law is developed based on sliding mode and derived from the Lyapunov stability analysis. The introduction of a boundary layer solves the problem of chattering. The proposed adaptive controller is globally asymptotically stable and guarantees zero steady state error for joint positions. The estimated friction coefficients can also approach the actual coefficients asymptotically. A simulation example is provided to demonstrate the performance of the proposed algorithm.

Key Words : Robust adaptive friction control scheme, Sliding surface, Adaptive update law, Lyapunov function, Chattering elimination

1. 서 론

로봇 매니퓰레이터의 추적 제어는 로봇 응용분야에서 가장 일반적인 과제이다. 그러나 미지의 작업 부하, 미지의 마찰 계수 그리고 링크 길이 및 질량에 대한 부정확한 정보와 같은 모델 불확실성이 있다. 게다가 마찰의 존재는 추적 지연, 위치 오차, 동작이 느린 응답, stick-slip 운동과 같은 비선형 마찰 현상을 유도하면서 로봇 매니퓰레이터에게 심각한 성능 제한을 부가한다[1][2]. 따라서 로봇 매니퓰레이터에서 마찰은 고정밀 운동 제어를 달성하는 데 있어 중요한 제약조건 중의 하나이다. 적절하게 보상해 주지 않는다면 마찰은 안정도 문제를 일으킬 수 있다. 이러한 이유 때문에 마찰 모델링, 동일식(identification) 그리고 보상 문제에 대해 많은 연구가 있었다.

로봇 매니퓰레이터는 앞에서 언급했듯이 불확실성이 있는 매우 비선형적인 동적 시스템이기 때문에 제어 법칙 설계를 위해 정확한 동적 방정식을 구하는 것은 어렵다. 이러한 불확실성을 보상하기 위하여 많은 연구자들이 적응제어 기법 또는 강건한 제어 원리를 제안하였다[3][4]. 강건한 제어기는 비구조적인 시변 외란은 허용되지만 점근적인 추적을 보장하지는 못한다. Li는 비선형 H_∞ 제어기로 된 제어 방법을 제안하였으며[5], [6]에서는 H_∞ 제어 문제를 해결하기 위해 Lyapunov 함수를 사용하여 시변 외란을 갖는 비선형 시스템에 대해 대국적 H_∞ 제어설계 기법을 소개하였다. 한편,

로봇 동역학의 선형 매개변수화에 기초를 두고 있는 적응 로봇 제어기법은 매니퓰레이터 동역학이 적절한 등가 매개변수 집합에 선형적으로 종속되도록 이들 매개변수를 선택하는데, [6]에서는 H_∞ 제어 문제를 해결하기 위해 Lyapunov 함수를 사용하여 시변 외란을 갖는 비선형 시스템에 대해 대국적 H_∞ 제어설계 기법을 소개하였다. 한편, 로봇 동역학의 선형 매개변수화에 기초를 두고 있는 적응 로봇 제어기법은 매니퓰레이터 동역학이 적절한 등가 매개변수 집합에 선형적으로 종속되도록 이들 매개변수를 선택하는데, 그러면 적응제어 알고리즘은 로봇 동역학의 비선형 시변 특성을 충분히 설명할 수 있다. 정적 마찰과 제한된 외란 그리고 모델 불확실성이 존재하는 경우 강건한 적응 마찰 제어 기법을 소개하였으며[1], 속도 측정값 없이, 보다 높은 추적 정확도를 달성하기 위해 마찰 적응 법칙과 속도 관측기를 사용한 적응 조인트 마찰 보상 알고리즘을 발표하였으며[3], 정적 및 동적 마찰 효과 둘 모두를 고려한 적응 제어기를 제안하였으며[7], 제한된 외란 또는 모델링 불확실성 둘 또는 하나가 존재하는 경우 강건한 적응 마찰 보상을 제안하였다[8].

본 논문에서는 [3]에서 사용한 마찰 모델을 이용하여 외란의 존재에도 불구하고 미지의 마찰 계수를 실시간으로 갱신하면서, 로봇 매니퓰레이터의 궤적 추적을 위한 새로운 적응제어기를 제안한다. 바람직하지 못한 정상상태 위치오차를 제거하기 슬라이딩 표면을 활용한다. 이러한 슬라이딩 표면의 사용은 제어 입력에 채터링을 발생시키는 데, 이를 해결하기 위해 경계층을 사용한다. Lyapunov 함수를 사용하여 제안한 제어기가 대국적 점근적으로 안정하며 정상상태 위치 오차가 0으로 수렴함을 보여준다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 마찰을 갖는 로봇 매니퓰레이터 동역학 모델을 제시하며, III장에서는 외

* 정 회 원 : 경남과학기술대학교 메카트로닉스공학과 교수 · 공박

E-mail : jkbae@gntech.ac.kr

접수일자 : 2011년 9월 16일

최종완료 : 2009년 10월 15일

란이 있는 로봇 매니퓰레이터에 대하여 강건한 적응 제어기를 제안하며, 제안한 제어기의 성능을 평가하기 위해 2 링크 매니퓰레이터 모델에 대하여 모의실험 및 결과가 IV장에 기술되어 있으며, 이후 결론 및 향후 연구 방향이 V장에 서술되어 있다.

2. 혼합 테스트

n 개의 링크를 갖는 매니퓰레이터에 대해 아래와 같은 조인트 영역 동적 모델을 고려한다.

$$M(q)\ddot{q} + B(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) + \gamma_f = \tau(t) \quad (1)$$

여기서 $\tau(t)$ 는 조인트에 인가된 $n \times 1$ 토크 벡터이며, q 는 $n \times 1$ 조인트 위치벡터이며, $M(q)$ 는 $n \times n$ 관성 행렬이며, $B(q, \dot{q})$ 는 조인트 영역에서 표현된 centrifugal 및 Coriolis 행렬이며, $G(q)$ 는 $n \times 1$ 중력 토크 벡터이며, γ_f 는 $n \times 1$ 마찰 토크 벡터이다.

본 논문에서는 다음과 같은 마찰 모델을 사용한다[3].

$$\gamma_f = \gamma_{vis}\dot{q} + [\gamma_{cou} + \gamma_{sti}\exp(-\gamma_{dec}\dot{q}^2)]\text{sgn}(\dot{q}) \quad (2)$$

여기서 γ_{vis} 는 비스코스(viscous) 마찰 계수를 나타내며, γ_{cou} 는 쿨롱 마찰 계수를 나타내며, γ_{sti} 는 정적 마찰 계수를 나타내며, γ_{dec} 는 Stribeck 효과에 대응하는 계수를 나타내며, signum 함수인 $\text{sgn}(\cdot)$ 는 다음과 같이 정의한다.

$$\text{sgn}(\dot{q}) = \begin{cases} +1 & \dot{q} > 0 \\ 0 & \dot{q} = 0 \\ -1 & \dot{q} < 0 \end{cases} \quad (3)$$

특성 1. 두 개의 행렬 $M(q)$ 와 $B(q, \dot{q})$ 는 독립적이지 않다. 특히, $B(q, \dot{q})$ 에 적절한 정의가 주어지면 $(\dot{M}(q) - 2B(q, \dot{q}))$ 는 skew-symmetric이다.

특성 2. 마찰 모델은 다음과 같은 특성을 갖는다. 먼저 식(2)에서 마찰 항 γ_f 은 조인트 사이에서 비결합된다고 가정하며, 다음과 같이 표현한다[3].

$$\gamma_f = \text{vec} \left\{ \gamma_{f_i}(\dot{q}_i) \right\} = \begin{bmatrix} \gamma_{f_1}(\dot{q}_1) \\ \vdots \\ \gamma_{f_n}(\dot{q}_n) \end{bmatrix} \quad (4)$$

비스코스 마찰은 다음과 같은 형을 가진다고 가정한다.

$$\gamma_{vis}\dot{q} = \text{vec} \left\{ \gamma_{vis_i}\dot{q}_i \right\} \quad (5)$$

여기서 γ_{vis_i} 는 상수 계수이며, $\gamma_{vis} = \text{diag}\{\gamma_{vis_i}\}$ 이다. 쿨롱 마찰은 다음과 같은 형을 가진다고 가정한다.

$$\gamma_{cou}\text{sgn}(\dot{q}) = \text{vec} \left\{ \gamma_{cou_i}\text{sgn}(\dot{q}_i) \right\} \quad (6)$$

여기서 γ_{cou_i} 는 상수 계수이며, $\gamma_{cou} = \text{diag}\{\gamma_{cou_i}\}$ 이다. 식(2)에서 마찰 항 $\gamma_{sti}\exp(-\gamma_{dec}\dot{q}^2)\text{sgn}(\dot{q})$ 은 정적 마찰과 Stribeck 효과의 결합이며, 아래와 같은 형태로 표현된다고 가정한다.

$$\gamma_{sti}\exp(-\gamma_{dec}\dot{q}^2)\text{sgn}(\dot{q}) = \text{vec} \left\{ \gamma_{sti_i}\exp(-\gamma_{dec_i}\dot{q}_i^2)\text{sgn}(\dot{q}_i) \right\} \quad (7)$$

여기서 γ_{sti_i} 와 γ_{dec_i} 는 상수 계수이며, $\gamma_{sti} = \text{diag}\{\gamma_{sti_i}\}$ 와 $\gamma_{dec} = \text{diag}\{\gamma_{dec_i}\}$ 이다.

조인트 영역 로봇 마찰 모델인 식(2)는 아래와 같은 형태로 표현할 수 있다.

$$\gamma_f = W_f(\dot{q})\theta \quad (8)$$

여기서 $W_f(\dot{q})$ 는 다음과 같은 형태로 표현되는 $n \times 3n$ regression 행렬이며,

$$\begin{aligned} W_f(\dot{q}) &= [\omega_{f1}(\dot{q}) \quad \omega_{f2}(\dot{q}) \quad \omega_{f3}(\dot{q})] \\ \omega_{f1} &= \text{diag}(\dot{q}_i) \\ \omega_{f2} &= \text{diag}(\text{sgn}(\dot{q}_i)) \\ \omega_{f3} &= \text{diag}(\exp(-\gamma_{dec}\dot{q}_i^2)\text{sgn}(\dot{q}_i)) \end{aligned} \quad (9)$$

θ 는 다음과 같은 형태로 정의되는 $3n \times 1$ 상수 매개변수 벡터이다.

$$\theta = [\text{vec}^T\{\gamma_{vis_i}\} \quad \text{vec}^T\{\gamma_{cou_i}\} \quad \text{vec}^T\{\gamma_{sti_i}\}] \quad (10)$$

계수 γ_{vis} , γ_{cou} 와 γ_{sti} 는 미지의 상수이지만, Stribeck 매개변수 γ_{dec} 는 알려진다고 가정한다.

3. 강건한 적응 마찰 제어기법

입력 외란을 포함한 n 링크 로봇 매니퓰레이터의 동역학 방정식을 고려한다.

$$M(q)\ddot{q} + B(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) + \gamma_f = \tau(t) + d(t, q, \dot{q}) \quad (11)$$

여기서 $d(t)$ 는 토크 외란을 나타내는 $n \times 1$ 외란 벡터이다.

가정 1 : 목적 궤적 q_d 는 q_d , $\dot{q}_d$ 및 $\ddot{q}_d$ 모두가 제한된 신호가 되도록 선택한다.

가정 2 : 외란 $d(t) = [d_1(t) \dots d_n(t)]$ 는 아래 식을 만족한다고 가정한다.

$$|d_i(t, q_i, \dot{q}_i)| \leq d_i^1 + d_i^2 |q_i| + d_i^3 |\dot{q}_i| \quad (12)$$

여기서 $d_i^j \geq 0$ 이고 $i = 1, \dots, n$ 과 $j = 1, 2, 3$ 이다.

설계목적은 q 와 $\dot{q}$ 가 목적궤적 q_d 와 $\dot{q}_d$ 를 추적하도록 $\tau(t)$ 의 제어법칙을 찾는 것이다. $\tau(t)$ 를 다음과 같이 선택하면

$$\tau(t) = M(q)\ddot{q}_d + B(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) + W_f(\dot{q})\hat{\theta} - K_P(q - q_d) - K_V(\dot{q} - \dot{q}_d) - K \text{sgn}(s) \quad (13)$$

여기서 $\hat{\theta}$ 은 θ 의 추정치이며, K_P , K_V 및 K 는 $n \times n$ 상수 symmetric diagonal positive definite matrix이며, s 는 슬라이딩 표면으로 다음과 같이 정의한다[9].

$$s = \dot{e} + K_V e + K_P \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (14)$$

여기서 $\dot{e} = \dot{q} - \dot{q}_d$, $e = q - q_d$ 이며, K_P 와 K_V 는 식(13)에서 정의한 것과 동일하다.

관성 행렬 $M(q)$ 은 역행렬이 가능함으로, 식(11)과 (13)으로부터 아래와 같은 페루프 방정식을 얻을 수 있다.

$$M(q)(\ddot{q} - \ddot{q}_d) + K_V(\dot{q} - \dot{q}_d) + K_P(q - q_d) = W_f(\dot{q})[\hat{\theta} - \theta] + d(t, q, \dot{q}) - K \text{sgn}(s)$$

$$\ddot{e} + K_V \dot{e} + K_P e = M(q)^{-1} [W_f(\dot{q})\tilde{\theta} + d(t, q, \dot{q}) - K \text{sgn}(s)] \quad (15)$$

여기서 $\ddot{e} = \ddot{q} - \ddot{q}_d$ 이며, $\tilde{\theta}$ 는 $\tilde{\theta} = \hat{\theta} - \theta$ 로 정의된 $n \times 1$ 마찰 추정 오차이다.

식(14)를 시간에 대해 미분하면

$$\dot{s} = \ddot{e} + K_V \dot{e} + K_P e \quad (16)$$

식(16)에 $M(q)$ 를 곱하면

$$M(q)\dot{s} = M(q)[\ddot{e} + K_V \dot{e} + K_P e] \quad (17)$$

식(15)을 식(17)에 대입하면 다음과 같다.

$$M(q)\dot{s} = W_f(\dot{q})\tilde{\theta} + d(t, q, \dot{q}) - K \text{sgn}(s) \quad (18)$$

강건한 적응 마찰 제어기법을 유도하기 위해, 다음의 Lyapunov function candidate를 고려한다.

$$V(t) = \frac{1}{2} s^T M(q) s + \frac{1}{2} \tilde{\theta}^T \Gamma^{-1} \tilde{\theta} \quad (19)$$

여기서 Γ 는 $3n \times 3n$ diagonal, positive definite, 적응 이득 행렬이다.

식(19)을 시간에 대해 미분하고, 2절에서 정의한 특성 1을 사용하면 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &= \frac{1}{2} [s^T \dot{M}(q) s + s^T \dot{M}(q) s + s^T M(q) \dot{s}] \\ &\quad + \frac{1}{2} \tilde{\theta}^T \Gamma^{-1} \dot{\tilde{\theta}} + \frac{1}{2} \tilde{\theta}^T \Gamma^{-1} \dot{\tilde{\theta}} \\ &= s^T [M(q)\dot{s} + B(q, \dot{q})s] + \tilde{\theta}^T \Gamma^{-1} \dot{\tilde{\theta}} \end{aligned} \quad (20)$$

식(20)에 식(18)을 대입하여 정리하면

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &= s^T [W_f(\dot{q})\tilde{\theta} + B(q, \dot{q})s + d(t, q, \dot{q}) - K \text{sgn}(s)] \\ &\quad + \tilde{\theta}^T \Gamma^{-1} \dot{\tilde{\theta}} \\ &= s^T [B(q, \dot{q})s + d(t, q, \dot{q}) - K \text{sgn}(s)] \\ &\quad + \tilde{\theta}^T [\Gamma^{-1} \dot{\tilde{\theta}} + W_f^T(\dot{q})s] \end{aligned} \quad (21)$$

마찰 매개변수 추정 벡터 $\hat{\theta}$ 가 아래의 적응 알고리즘을 사용하여 갱신(update)된다고 하자.

$$\dot{\hat{\theta}} = -\Gamma W_f^T(\dot{q})s \quad (22)$$

그러면 식(21)은 식(23)과 같이 되는데,

$$\dot{V}(t) = s^T [B(q, \dot{q})s + d(t, q, \dot{q}) - K \text{sgn}(s)] \quad (23)$$

미지의 마찰 매개변수 θ 는 상수이므로 $\dot{\theta} = \hat{\theta}$ 이기 때문이다.

$\dot{V}(t)$ 가 $s = 0$ 에서만 사라지는 s 의 음의 정부호(negative definite) 함수가 되도록 K 를 적절하게 선택할 수 있다면, 그러면 Lyapunov 이론에 의해서 슬라이딩 표면 $s = 0$ 은 asymptotically attractive가 된다[9][10][11]. 이것은 식(24)이 되도록 먼저 알려진 함수 f_{ij} 가 존재한다고 가정함으로써 이를 수 있다.

$$|B_{ij}(q, \dot{q})| < f_{ij}(q, \dot{q}) \quad (24)$$

이들 함수는 $B(q, \dot{q})$ 의 특성 때문에 항상 존재한다. 그런 다음 식(23)의 K 를 다음과 같이 선택한다.

$$K_i = \sum_{j=1}^n f_{ij}(q, \dot{q}) |s_j| + d_i^1 + d_i^2 |q_i| + d_i^3 |\dot{q}_i| + \delta_i \quad i = 1, \dots, n \quad (25)$$

여기서 $\delta_i > 0$ 은 임의의 상수이다. 식(25)을 식(23)에 대입하면 식(26)과 같다.

$$\dot{V}(t) \leq - \sum_{i=1}^n \delta_i |s_i| < 0 \quad (26)$$

식(26)은 출력 추적 오차가 슬라이딩 표면 s 에 수렴한다는 것을 보여준다. 이것은 다시 $t \rightarrow \infty$ 일 때 $e \rightarrow 0$ 을 의미한다. 따라서 제한한 적응 제어기는 대국적 잠근적으로 안정하며 추적 오차가 0이 됨을 보증한다.

앞에 주어진 제어법칙들은 불연속적이다. 이러한 제어법칙의 합성은 슬라이딩 표면 $s = 0$ 주위에서 궤적의 채터링(chattering)을 일으키는 것으로 알려져 있다. 이와 같은 문제는 Slotine[12][13]에 의해 제안한 것과 같이 슬라이딩 표면 근처에서 불연속적인 제어법칙을 부드럽게 함으로써 제거할 수 있다. 이렇게 하기 위해 signum 비선형성을 포화 비선형성으로 바꾸며 되는데, 이것은 다음과 같이 정의하며

$$\text{sat}(s) = \begin{cases} 1 & s/\phi \geq 1 \\ s/\phi & -1 < s/\phi < 1 \\ -1 & s/\phi \leq -1 \end{cases}$$

여기서 ϕ 는 경계층 두께이다[14].

경계층으로 수렴성을 보장하기 위한 수정된 제어 법칙과 마찰 적응 법칙은 다음과 같다.

$$\tau(t) = M(q)\ddot{q}_d + B(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) + W_f(\dot{q})\hat{\theta} - K_P(q - q_d) - K_V(\dot{q} - \dot{q}_d) - K\text{sat}(s/\phi) \quad (27)$$

$$\dot{\hat{\theta}} = -\Gamma W_f^T(\dot{q})s_\Delta \quad (28)$$

$$K_i = \sum_{j=1}^n f_{ij}(q, \dot{q}) |s_{\Delta j}| + d_i^1 + d_i^2 |q_i| + d_i^3 |\dot{q}_i| + \delta_i \quad i = 1, \dots, n \quad (29)$$

여기서 $s_\Delta = [s_{\Delta 1} \dots s_{\Delta n}]$ 이고 $s_{\Delta i} = s_i - \phi_i \text{sat}(s_i/\phi_i)$ 이다. 식(19) 대신에 다음의 Lyapunov 함수를 사용하고, 경계층 외부에서 $\dot{s}_\Delta = \dot{s}$ 인 반면에 경계층 내부에서 $s_\Delta = 0$ 임에 주목함으로써 슬라이딩 표면 경계층으로 추적 오차의 대국적 수렴성을 다시 증명할 수 있는데

$$V(t) = \frac{1}{2} s_\Delta^T M(q) s_\Delta + \frac{1}{2} \tilde{\theta}^T \Gamma^{-1} \tilde{\theta} \quad (30)$$

이것은 다음과 같다.

$$\dot{V}(t) \leq - \sum_{i=1}^n \delta_i |s_{\Delta i}| < 0 \quad (31)$$

식(30)은 경계층 내부에서 $\dot{V}(t) = 0$ 을 의미하고, 이것은 식(31)이 모든 지역에서 정당하며 따라서 궤적들이 결국에는 경계층으로 수렴한다는 것을 보증한다[15].

4. 시뮬레이션 및 결과

본 장에서는 그림 1과 같은 2 링크 로봇 매니퓰레이터 모델을 사용하여 제한한 적응 제어기의 성능을 검증하기 위해 컴퓨터 시뮬레이션을 제시한다.

그림 1 2 링크 로봇 매니퓰레이터 모델

Fig. 1 2 link robot manipulator model

두 개의 링크를 갖는 강체 매니퓰레이터의 동역학 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{q}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\beta \dot{q}_2 & -\beta(\dot{q}_1 + \dot{q}_2) \\ \beta \dot{q}_1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} G_1 \\ G_2 \end{bmatrix} + W_f(\dot{q})\theta = \begin{bmatrix} \tau_1(t) \\ \tau_2(t) \end{bmatrix}$$

여기서

$$M_{11} = m_3 l_2^2 + 2m_2 l_1 l_2 \cos(q_2) + (m_1 + m_2) l_1^2$$

$$M_{12} = m_2 l_2^2 + m_2 l_1 l_2 \cos(q_2)$$

$$M_{21} = m_2 l_2^2 + m_2 l_1 l_2 \cos(q_2)$$

$$M_{22} = m_2 l_2^2$$

$$\beta = m_2 l_1 l_2 \sin(q_2)$$

$$G_1 = (m_1 + m_2) g l_1 \cos(q_1) + m_2 g l_2 \cos(q_1 + q_2)$$

$$G_2 = m_2 g l_2 \cos(q_1 + q_2)$$

$$W_f(\dot{q}) = \begin{bmatrix} \dot{q}_1 & 0 \\ 0 & \dot{q}_2 \\ \text{sgn}(\dot{q}_1) & 0 \\ 0 & \text{sgn}(\dot{q}_2) \\ \text{sgn}(q_1)\exp(-\gamma_{dec1}\dot{q}_1^2) & 0 \\ 0 & \text{sgn}(\dot{q}_2)\exp(-\gamma_{dec2}\dot{q}_2^2) \end{bmatrix}^T$$

$$\theta = [\gamma_{vis1} \ \gamma_{vis2} \ \gamma_{cou1} \ \gamma_{cou2} \ \gamma_{sti1} \ \gamma_{sti2}]^T$$

다음과 같은 매개변수 값을 사용하였다.

$$m_1 = 1kg, \ m_2 = 1kg, \ l_1 = 1m, \ l_2 = 1m, \\ g = 9.8, \ \gamma_{dec1} = 0.5, \ \gamma_{dec2} = 0.5$$

이득 행렬 값들은 다음과 같이 선택하였다.

$$K_P = \text{diag}[6, 6], \ K_V = \text{diag}[8, 8], \\ \Gamma = \begin{bmatrix} 0.4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1.2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1.5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 3.5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 6.0 \end{bmatrix}$$

그리고 행렬 $B(q, \dot{q})$ 항들은 다음과 같이 상한되며,

$$\begin{aligned} |B_{11}| &< \beta|\dot{q}_2| < \bar{\beta}|\dot{q}_2| = f_{11} \\ |B_{12}| &< \beta|\dot{q}_1 + \dot{q}_2| < \bar{\beta}|\dot{q}_1 + \dot{q}_2| = f_{12} \\ |B_{21}| &< \beta|\dot{q}_1| < \bar{\beta}|\dot{q}_1| = f_{21} \\ |B_{22}| &= 0 = f_{22} \end{aligned}$$

$\bar{\beta} = 1.25$ 로 선택하였다. 외란은 다음과 같다고 가정하였으며

$$d(t, q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} \sin(3t) + \dot{q}_1 \\ \cos(3t) + \dot{q}_2 \end{bmatrix}$$

이에 대응하는 d_i^j 와 δ_i^j ($i = 1, \dots, n$ 과 $j = 1, 2, 3$)의 값은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} d_1^1 &= 1.5, \ d_1^2 = 1.2, \ d_1^3 = 1.3, \ \delta_1 = 3 \\ d_2^1 &= 1.5, \ d_2^2 = 1.3, \ d_2^3 = 1.2, \ \delta_2 = 3 \end{aligned}$$

예제 1: 제어기(13)와 적응법칙(22)을 사용한 경우 목적 궤적은 다음과 같으며

$$q_{d1} = -\frac{\pi}{2} + (-\cos 1.2t + \sin 2.4t)$$

$$q_{d2} = \frac{\pi}{2} + (\sin t + \cos 1.5t)$$

초기 위치와 속도는 아래와 같다고 가정하였다.

$$q_1(0) = -30^\circ, \ q_2(0) = 30^\circ, \ \dot{q}_1(0) = \dot{q}_2(0) = 0$$

그리고 마찰 추정치 $\hat{\theta}$ 는 다음과 같이 선택하였으며,

$$\hat{\theta} = [1.2 \ 1.2 \ 0.8 \ 0.8 \ 0.6 \ 0.6]^T$$

마찰의 실제 값은 다음과 같다고 가정하였다.

$$\theta = [2.0 \ 2.0 \ 1.6 \ 1.6 \ 1.2 \ 1.2]^T$$

예제 1에 대해 시뮬레이션을 수행한 결과는 그림 2와 같다. 그림 2(a)는 추적 오차, 그림 2(b)는 슬라이딩 표면인데 0으로 수렴함을 알 수 있다. 그림 2(c)와 (d)는 각 조인트에 작용하는 토크 입력으로 채터링이 발생함을 보여준다. 그림 2(e)와 (f)는 조인트 1과 조인트2의 마찰을 추정할 결과이다. 추정된 마찰 계수 값들이 실제 계수 값에 점근적으로 수렴함을 알 수 있다.

(a)

(b)

(c)

(d)

(e)

(f)

그림 2 예제 1에 대한 시뮬레이션 결과 : (a) 추적 오차, (b) 슬라이딩 표면, (c) 조인트 1 토크 입력, (d) 조인트 2 토크 입력, (e) 조인트 1 마찰 추정치, (f) 조인트 2 마찰 추정치.

Fig. 2 Simulation results for example 1: (a) tracking errors, (b) sliding surfaces, (c) joint 1 torque input, (d) joint 2 torque input, (e) joint 1 friction estimates, (f) joint 2 friction estimates.

예제 2: 제어기(27)와 적응법칙(28)을 사용한 경우 목적 궤적을 비롯한 모든 값들은 예제 1의 경우와 동일하며, 경계층 두께를 다음과 같이 선택하였다.

$$\phi_1 = \phi_2 = 0.5$$

그림 3은 예제 2에 대한 시뮬레이션 결과이다. 그림 3(a)은 추적 오차, 그림 3(b)은 슬라이딩 표면인데 예제 1과 같

이 0으로 수렴함을 보여준다. 그림 3(c)와 (d)는 각 조인트에 작용하는 토크 입력으로 채터링이 제거되었음을 보여준다. 그림 3(e) 및 (f)은 조인트 1과 조인트2의 마찰을 추정한 결과로 추정된 마찰 계수 값이 실제 값에 점근적으로 수렴함을 보여준다.

(a)

(b)

(c)

(d)

참 고 문 헌

- [1] J.S.Chen and J.C.Juang,"A Robust Friction Control Scheme of Robot Manipulators," in Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 3266-3271, 2003.
- [2] B.Friedland and Y.J.park," On Adaptive Friction Compensation," IEEE Tran. on Automatic Control vol. 37, no. 10, pp.1609-1612, 1992.
- [3] Q.H.Xia, S.Y.Lim, M.H.Ang and T.M.Lim,"Adaptive Joint Friction Compensation Using a Model-Based Operational Space Velocity Observer," " in Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 3081-3086, 2004.
- [4] C.H.Lee and J.J.Lee,"Adaptive Control of Robot Manipulators Using Multiple Neural Networks," in Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.1074-1079, 2003.
- [5] S.Li,"Nonlinear H_∞ Controller Design for a Class of Nonlinear Control System," 23rd Int. Conf. on Industrial Electronic, Control and Instrumentation, pp. 291-294, 1999.
- [6] L.Acho, Y.Orlov and L.Aguilar,"Global H_∞ control Design for Tracking Control of Robot Manipulators," Proc. of the American Control Conference, pp.3986-3990, 2002.
- [7] Y.L.Zhu and P.R.Pagilla,"Static dynamic friction compensation in trajectory tracking control of robot," in Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 2644-2649, 2002.
- [8] P.Tomei,"Robust adaptive friction compensation for tracking control of robot manipulators," IEEE Tran. on Automatic Control vol. 45, no. 11, pp.2164-2169, 2000.
- [9] S.W.Wijesoma and R.J.Richards,"Robust trajectory following of robots using computed torque structure with VSS", Int. Jour. Control, vol. 52, no. 4, pp. 935-962, 1990.
- [10] T.P.Leung, Q.J.Zhou and C.Y.Su,"An adaptive variable structure model following control design for robot manipulators," IEEE Tran. on Automatic Control vol. 36, pp. 347-353, 1991.
- [11] C.Y.Su and Y.Stepanenko," Adaptive Sliding Mode Control of Robot Manipulators with General Sliding Manifold", Proc. of the IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robotics and Systems, pp. 1255-1259, 1993.
- [12] J.J.E.Slotine and S.S.Sastry,"Tracking control of nonlinear system using sliding surfaces, with applications to robot manipulator", Int. Jour. Control, vol. 38, pp. 465-492, 1983.
- [13] J.J.E.Slotine,"Sliding controller design for nonlinear system", Int. Jour. Control, vol. 40, pp. 421-434, 1984.

(e)

(f)

그림 3 예제 2에 대한 시뮬레이션 결과 : (a) 추적 오차, (b) 슬라이딩 표면, (c) 조인트 1 토크 입력, (d) 조인트 2 토크 입력, (e) 조인트 1 마찰 추정치, (f) 조인트 2 마찰 추정치.

Fig. 3 Simulation results for example 2: (a) tracking errors, (b) sliding surfaces, (c) joint 1 torque input, (d) joint 2 torque input, (e) joint 1 friction estimates, (f) joint 2 friction estimates.

5. 결 론

본 논문에서는 미지의 마찰 계수와 외란의 존재에도 불구하고 로봇 매니퓰레이터의 추적 제어를 위해 강건한 적응 마찰 제어를 제안하였다. 마찰 적응 알고리즘은 바람직하지 못한 정상상태 위치오차를 제거하기 위해 슬라이딩 표면을 이용하여 설계하였다. 슬라이딩 표면의 사용은 채터링을 유발하는데, 이를 해결하기 위해 경계층을 도입하였다. Lyapunov 안정도 해석을 이용하여, 제안한 적응 제어기는 대국적 점근적으로 안정하며 각 조인트 위치에 대한 정상상태 오차가 0이 됨을 보증한다. 또한 추정된 마찰 계수 값이 점근적으로 실제 계수 값에 수렴하였다. 시뮬레이션 결과는 제안한 적응 제어기가 높은 궤적 정확도를 이루는 것이 가능함을 보여준다.

감사의 글

이 논문은 2010년도 경남과학기술대학교 기성회 연구비에 의하여 연구되었음

- [14] J.J.E.Slotine and W. Li," On the adaptive control of robot manipulators," The International Journal of Robotics Research, vol. 6, no.3, pp. 49-59, 1987.
- [15] Z.Qijie and S.Chuny,"An adaptive sliding mode control scheme for robot manipulators", Int. Jour. Control, vol. 57, no. 2, pp. 261-271, 1993.

저 자 소 개

배 준 경 (裵 竣 炯)

1958년 12월 7일생

1982년 국민대학교 전자공학과 학사졸업

1984년 경희대학교 전자공학과 석사졸업

1990년 경희대학교 전자공학과 박사졸업

1990년~현재 경남과학기술대학교 메카트로닉스공학과 교수

Tel : +82-055-751-3381