

섭동 추정기를 갖는 슬라이딩 모드 제어기의 성능 평가

최승복[†] · 함준호* · 한영민**

(2002년 1월 14일 접수, 2002년 6월 18일 심사완료)

Performance Evaluation of Sliding Mode Controller with Perturbation Estimator

Seung-Bok Choi, Joon-Ho Ham and Young-Min Han

Key Words : Sliding Mode Control(슬라이딩 모드 제어), Perturbation Estimator(섭동 추정기), Sampling Time(샘플링 시간), Control Robustness(제어 강건성)

Abstract

In the conventional sliding mode control technique, a priori knowledge of the bound of external disturbances or/and parameter uncertainties is required to assure control robustness. This, however, may not be easy to obtain in practical situation. This work presents a novel methodology, a sliding mode controller with perturbation estimator, which offers a robust control performance without a priori knowledge about the perturbations (disturbances and parameter uncertainties). The proposed technique is featured by an integrated average value of the imposed perturbation over a certain sampling period. In order to demonstrate the effectiveness of the proposed methodology, a two-link robotic system is adopted and its position control performance is evaluated. In addition, a comparative work between the conventional technique and the proposed one is undertaken.

1. 서론

대상 제어시스템의 매개변수변화 및 외란에 대하여 강건한 제어를 위해 지난 20여년간 슬라이딩 모드 제어(sliding mode control : SMC)에 대한 연구가 활발히 진행되어오고 있다.⁽¹⁾ 그러나 대부분의 기존 SMC 설계에 있어 불확실성(혹은 섭동 : perturbation)에 대한 한계값을 미리 알고 있다고 가정하기 때문에 과도한 설계가 이루어지고 있다. 특히, 제어강건성의 향상과 슬라이딩 평면까지 도달하는 리칭(reaching) 시간을 줄이기 위해 높은 제어 입력게인을 사용하면 심한 떨림(chattering) 현상이 발생하여 시스템 하드웨어 성능에 많은 문제점을 유발한다.⁽²⁾

입력게인의 증가없이 제어강건성을 증가시키기 위한 방법은 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 첫번

째 방법은 섭동에 민감한 리칭상태(reaching phase)를 제거하기 위하여 알맞은 슬라이딩 서피스를 설계하는 것이다. Slotine 과 Sastry⁽¹⁾는 초기오차를 영(zero)으로 선택하여 리칭상태를 제거하였으며, Choi 와 Park^(3,4)은 시간에 따라 변하는 이동 슬라이딩 서피스를 제안하여 리칭상태를 최소화하였다 두번째 방법은 시스템에 들어오는 섭동을 예측(추정)하여 제어강건성과 정확성을 높이는 것이다. Kozek⁽⁵⁾ 등은 SMC 에 선형 외란 관측기를 추가하여 고속 전자기 시스템의 강건제어를 수행하였고, Lu 와 Chen⁽⁶⁾은 시스템 모델 불확실성과 외란의 예측을 위한 섭동 관측기(perturbation estimator)를 제안하여 전자기 부상시스템의 강건제어를 수행하였으며, Liu 와 Peng⁽⁷⁾은 시스템 불확실성과 변수변화를 외란으로 간주하여 이를 예측하기 위한 관측기를 설계한 후 로봇팔 운동제어에 적용하였다. 한편 Elmali 와 Olgac^(8,9)은 모델링 불확실성과 외란의 예측을 위하여 슬라이딩 서피스의 동적운동을 고려한 SMCPE(sliding mode control with perturbation estimation)를 제안하여 효과적인 로봇의 강건제어를 수행하였다.

본 연구에서 제안한 섭동 예측방법은 Elmali 와 Olgac 이 제안한 SMCPE 와 그 형태가 매우 유사

[†] 책임저자, 회원, 인하대학교 기계공학과
E-mail : seungbok@inha.ac.kr
TEL : (032)860-7319 FAX : (032)868-1716

* 인하대학교 기계공학과

** 인하대학교 대학원 기계공학과

하나 예측기법이 상이하다. SMCPE 기법은 시스템의 상태방정식에서 섭동을 제외한 모든 항을 알고 있다고 가정하여 간단한 대수연산을 통하여 예측하는 방법으로서 다른 섭동 관측방법들과 비교하여 신뢰할 수 있는 관측값에 대한 수렴시간을 갖고 있으며, 위상차가 거의 없다고 볼 수 있다. 그러나 SMCPE 는 이론 전개과정에서 몇 가지 가정과 특징 때문에 본 연구에서 제안하는 방법에 비해 상대적인 단점이 존재한다. 예를 들어, SMCPE 는 섭동을 계산할 때 시스템의 상태 방정식에서 미분항을 알아야 하기 때문에 이로 인한 오차발생이 불가피하다. 또한 시스템 상태방정식의 미분항은 차수가 높을수록 잡음(noise)이 많아지고 불연속적인 값이 나오는 경향이 있어 오차가 더욱 더 증가하게 된다. 물론 필터를 사용하여 이에 대한 문제점을 해결할 수 있지만 이로 인한 제어성능 저하가 발생할 수 있다. 본 연구에서는 이러한 단점을 해결하기 위하여 상태 방정식의 미분항 대신 일정기간 동안의 섭동 적분 평균값을 사용하여 섭동을 정확히 예측하는 방법을 제안하였다. 특히, 본 연구에서 제안하는 방법은 섭동을 예측하기 위한 샘플링 주기와 제어입력 샘플링 주기의 비(ratio)를 고려하여 제어기의 실제 구현 시 발생할 수 있는 공진현상을 효과적으로 피할 수 있으며, 섭동추정 성능이 센서 성능에 종속되지 않게 할 수 있는 등 많은 장점을 갖고 있다. Elmali 와 Olgac 가 제안한 SMCPE 와 구별하기 위하여 본 연구에서 제안한 방법을 SMCPEP(sliding mode controller with perturbation estimator)이라 명명하였으며, 토크 외란과 질량 불확실성이 존재하는 2 링크 로봇 시스템을 채택하여 SMCPE 와 SMCPEP 의 위치제어 성능에 대한 비교 연구를 수행하였다.

2. SMCPEP 의 설계

시스템 변수변화와 외란이 들어오는 다음의 2 차 비선형 시스템을 고려한다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1(t) &= x_2(t) \\ \dot{x}_2(t) &= f(x_1(t), x_2(t)) + \Delta f(x_1(t), x_2(t)) \\ &\quad + bu(t) + \Delta bu(t) + d(t) \end{aligned} \quad (1)$$

상기식에서 $u(t)$ 는 제어입력, $d(t)$ 는 외란, 그리고 $\Delta f(\cdot)$ 와 Δb 는 시스템과 입력의 불확실성(섭동)을 각각 나타낸다. 주어진 제어시스템은 비교적 간단하게 표현되지만 로봇을 비롯한 많은 물리적 시스템이 식 (1)과 같은 형태의 모델을 갖는다. 일반적인 슬라이딩 모드 제어를 구성하기 위한 첫번째 단계로서 다음과 같은 안정된 슬라이딩 서피스(식 (1)의 경우 직선)를 설정한다.

$$s(t) = cx_1(t) + x_2(t) = 0, \quad c > 0 \quad (2)$$

따라서 식 (1)과 (2)로 부터 $s(t)$ 의 동적모델을 다음과 같이 얻는다.

$$\begin{aligned} \dot{s}(t) &= cx_2(t) + f(x_1(t), x_2(t)) + \Delta f(x_1(t), x_2(t)) \\ &\quad + bu(t) + \Delta bu(t) + d(t) \\ &= cx_2(t) + f(x_1(t), x_2(t)) + bu(t) + \psi(t), \\ \psi(t) &= \Delta f(t) + \Delta bu(t) + d(t) \end{aligned} \quad (3)$$

슬라이딩 모드 존재조건 $s(t)\dot{s}(t) < 0$ 이 만족하도록 기존의 SMC, $u(t)$, 를 설계하면 다음과 같다.^(9,10)

$$\begin{aligned} u(t) &= \frac{u_{equ}(t) - k \operatorname{sgn}(s(t)) - Ps(t)}{b}, \\ k &> \left| \frac{\Delta f + \frac{\Delta b}{b} u_{equ} + d}{1 + \frac{\Delta b}{b}} \right|_{\text{worst case}} \\ u_{equ}(t) &= -cx_2(t) - f(x_1(t), x_2(t)) \end{aligned} \quad (4)$$

상기식에서 k 와 P 는 각각 불연속 제어제인과 비례 제어제인이며, $\operatorname{sgn}(\cdot)$ 은 부호함수를 나타내고, $|\cdot|$ 은 절대값을 나타낸다. 식 (4)에서 알 수 있듯이 제어제인 k 의 선택을 위해서는 불확실성과 외란의 최대 변화값을 알아야 하며, 이에 대한 정보가 미비할 때는 매우 큰 k 값을 사용하여 시스템 안정성이 보장되도록 한다. 그러나 이 경우 제어시스템의 과설계가 이루어져 입력의 크기가 증가하게 되며, 이로 인한 떨림 현상이 더욱 증가하여 제어 성능에 나쁜 영향을 미치게 된다. 따라서 불확실성과 외란에 대한 정확한 예측(혹은 추정)이 필요하다.

우선 Elmali 와 Olgac^(8,9)이 제안한 SMCPE 를 식 (1)에 적용하여 제어기를 설계하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \hat{u}(t) &= \frac{u_{equ}(t) - \hat{k} \operatorname{sgn}(s(t)) - Ps(t) - \psi_{estimated}(t)}{b}, \\ \hat{k} &> |\psi_{error}| \end{aligned} \quad (5)$$

여기서,

$$\begin{aligned} \psi_{estimated}(t) &= \dot{x}_{2(calculated)}(t) - f(x_1(t), x_2(t)) - \hat{u}(t - \delta) \\ \dot{x}_{2(calculated)}(t) &= \{x_2(t) - x_2(t - \delta)\} / \delta \\ \psi_{error}(t) &= \psi(t) - \psi_{estimated}(t) \end{aligned} \quad (6)$$

식 (4)에 주어진 기존의 SMC 제어입력 $u(t)$ 와 구분하기 위하여 $\hat{u}(t)$ 을 사용하였고, δ 는 제어(혹은 섭동추정) 샘플링 시간을 나타낸다. 일반적으로

센서에서 측정된 $x_2(t)$ 값을 수치적으로 미분하여 섭동추정에 이용하고 있기 때문에 SMCPE의 경우 섭동추정 성능이 센서 성능에 종속되며, 계측과 계산과정에서 불연속섭동 관측 결과가 나올 수 있다. 또한 섭동추정에 사용된 값이 제어입력을 제외하고는 δ 시간 동안 변하기 때문에 δ 가 증가하게 되면 상대적으로 섭동추정 오차가 크게 증가한다.

본 연구에서 제안하는 SMCPE를 구성하기 위해 섭동추정항이 추가된 $s(t)$ 의 동적모델을 다음과 같이 고려한다.

$$\begin{aligned} \dot{s}(t) = & cx_2(t) + f(x_1(t), x_2(t)) + u_{equ}(t) \\ & - \hat{k} \operatorname{sgn}(s(t)) - Ps(t) - \psi_{estimated}(t) + \psi(t) \end{aligned} \quad (7)$$

상기식에서 $u_{equ}(t)$ 는 식 (4)의 SMC에 적용한 $u_{equ}(t)$ 와 같다. 또한, 우변의 1, 2, 7항은 연속적인 값을, 3, 4, 5항은 제어샘플링 시간(δ) 동안 일정한 값을, 6항은 섭동추정 시간($N \cdot \delta$) 동안 일정한 값을 가지므로 다음과 같이 각 항들에 대해 임의시간 $T - N \cdot \delta$ 에서 T 까지 적분을 수행할 수 있다.

$$\begin{aligned} \int_{T-N\delta}^T \dot{s}(t) dt &= s(T) - s(T - N \cdot \delta) \\ \int_{T-N\delta}^T (cx_2(t) + f(x_1(t), x_2(t)) + u_{equ}(T - n \cdot \delta)) dt \\ &= \sum_{n=1}^N \left\{ \int_{T-n\delta}^{T-(n-1)\delta} (cx_2(t) + f(x_1(t), x_2(t)) \right. \\ &\quad \left. + u_{equ}(T - n \cdot \delta)) dt \right\} \\ \int_{T-N\delta}^T -\hat{k} \operatorname{sgn}(s(t)) - Ps(t) dt \\ &= - \sum_{n=1}^N (\delta \cdot (\hat{k} \cdot \operatorname{sgn}(s(T - n \cdot \delta)) + Ps(T - n \cdot \delta))) \\ \int_{T-N\delta}^T -\psi_{estimated}(t) dt &= -N \cdot \delta \cdot \psi_{estimated}(T - N \cdot \delta) \end{aligned} \quad (8)$$

상기식을 같은 임의시간에 대한 $\psi(t)$ 의 적분항과 함께 정리하면 다음을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \int_{T-N\delta}^T \psi(t) dt \\ &= s(T) - s(T - N \cdot \delta) + N \cdot \delta \cdot \psi_{estimated}(T - N \cdot \delta) \\ &\quad + \sum_{n=1}^N (\delta \cdot (\hat{k} \cdot \operatorname{sgn}(s(T - n \cdot \delta)) + Ps(T - n \cdot \delta))) \\ &\quad + \sum_{n=1}^N \left\{ \int_{T-n\delta}^{T-(n-1)\delta} (-cx_2(t) - f(x_1(t), x_2(t)) \right. \\ &\quad \left. - u_{equ}(T - n \cdot \delta)) dt \right\} \end{aligned} \quad (9)$$

상기식에서 N 은 제어샘플링 시간(δ)에 대한 섭

동추정 시간($N \cdot \delta$)의 비이며, 이는 자연수로 1보다 큰 값을 선택한다. 만약 N 을 1보다 작은 값으로 설정한다면 섭동주기가 제어주기보다 빠르게 되어 매우 빠른 반응시간의 센서를 요하게 된다. 또한 N 은 제어주기와 같은 주기를 갖는 섭동의 영향을 최소화하기 위하여 2의 배수로 설정하는 것이 바람직하다. 다시 말하면 N 을 2의 배수로 설정하게 되면 제어주기를 갖는 섭동 성분이 엘리어싱(aliasing)에 의하여 DC(저주파) 성분의 추정된 섭동으로 나타나게 되어 저주파 필터를 사용한 것과 같은 효과를 가져올 수 있다. 그러나 SMCPE의 경우 실제로 저주파 필터를 사용한 것이 아니기 때문에 이로 인한 응답 지연과 정확도 하락이 발생하지 않는다.

섭동추정을 위해 식 (9) 좌변의 적분값과 동일한 값을 갖고 있는 상수를 다음과 같이 정의한다.

$$\int_{T-N\delta}^T \psi_{average}(T) dt = \int_{T-N\delta}^T \psi(t) dt \quad (10)$$

상기식은 $T - N \cdot \delta$ 에서 T 시간 동안의 $\psi(t)$ 의 적분값과 $\psi_{average}(T)$ 의 적분값이 동일함을 의미하는 것이다. 따라서 섭동 평균값은 다음의 관계로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \psi_{average}(T) = & \frac{s(T) - s(T - N \cdot \delta)}{N \cdot \delta} \\ & + \frac{\sum_{n=1}^N (\hat{k} \operatorname{sgn}(s(T - n \cdot \delta)) + Ps(T - n \cdot \delta))}{N} \\ & + \frac{\sum_{n=1}^N (u_{equ}(T - (n-1) \cdot \delta) - u_{equ}(T - n \cdot \delta))}{2 \cdot N} \\ & + \psi_{estimated}(T - N \cdot \delta) \end{aligned} \quad (11)$$

식 (9)에서 마지막 적분항의 실제값은 정확히 계산하기 어렵기 때문에 식 (11)의 세번째 항과 같이 근사값을 사용하였다. 이렇게 구한 $\psi_{average}(T)$ 를 이용하여 다음 제어주기에 쓸 $\psi_{estimated}(T)$ 를 Taylor 전개에 의해 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\psi_{estimated}(T) = \sum_{i=0}^l (N \cdot \delta)^i \cdot \psi^{(i)}_{average}(T) / i! \quad (12)$$

따라서 본 연구에서 제안한 SMCPE는 식 (5), (11), (12)로 구성된다. 앞에서 언급 하였듯이 본 연구에서 제안한 SMCPE는 섭동주기를 조절할 수 있기 때문에 센서 응답 성능에 따른 섭동주기의 유연성을 갖고 있으며, $\psi_{average}(T)$ 추정에 사용한 $s(\cdot)$ 의 값은 제어입력에 사용한 $s(\cdot)$ 값과 반드시 같지 않아도 된다.

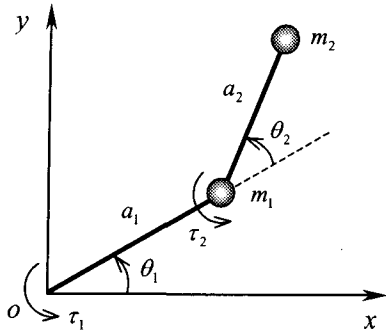


Fig. 1 A two-link planar manipulator

3. 로봇 위치 제어에 적용

본 연구에서 제안한 SMCPEP 과 기존의 SMCPE 의 제어성능 비교를 위해 Fig. 1 과 같은 2 링크 강체로봇 시스템의 평면운동을 고려한다. 이 시스템의 운동 지배방정식은 다음과 같이 주어진다.⁽¹¹⁾

$$\begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$= F + B\tau + d = F + u + d$$

여기서,

$$F = [f_1 \quad f_2]^T, \quad d = [d_1 \quad d_2]^T$$

$$\tau = [\tau_1 \quad \tau_2]^T, \quad B = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{bmatrix}, \quad u = [u_1 \quad u_2]^T$$

$$f_1 = \frac{m_2 a_2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 \sin \theta_2 + m_2 a_1 \dot{\theta}_1^2 \sin \theta_2 \cos \theta_2}{(m_1 + m_2 + m_2 \cos^2 \theta_2) a_1}$$

$$f_2 = \frac{-m_2 a_2^2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 \sin \theta_2 - (m_1 + m_2) a_1^2 \dot{\theta}_1^2 \sin \theta_2}{(m_1 + m_2 + m_2 \cos^2 \theta_2) a_1 a_2}$$

$$- \frac{m_2 a_1 a_2 (2\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_2^2) \sin \theta_2 \cos \theta_2}{(m_1 + m_2 + m_2 \cos^2 \theta_2) a_1 a_2}$$

$$b_{11} = \frac{1}{(m_1 + m_2 + m_2 \cos^2 \theta_2) a_1^2} \quad (14)$$

$$b_{12} = \frac{-a_2 - a_1 \cos \theta_2}{(m_1 + m_2 + m_2 \cos^2 \theta_2) a_1^2 a_2}$$

$$b_{21} = \frac{-a_2 - a_1 \cos \theta_2}{(m_1 + m_2 + m_2 \cos^2 \theta_2) a_1^2 a_2}$$

$$b_{22} = \frac{(m_1 + m_2) a_1^2 + m_2 a_2^2 + 2m_1 a_1 a_2 \cos \theta_2}{(m_1 + m_2 + m_2 \cos^2 \theta_2) m_2 a_1^2 a_2^2}$$

상기식에서 f_i 와 d_i 는 각각 2 링크 강체로봇 시스템과 외란을 의미하며, 불확실성을 부가하기 위

해 실제의 질량을 $m_{1(real)}$, $m_{2(real)}$ 이라 정의한다. 이렇게 하면 시스템 f_i 항과 입력항에 섭동(변수 변화)이 추가되어 본 연구의 문제 설정에서 도입한 식 (1)과 같은 형태의 모델이 된다. 따라서 제어기의 컴퓨터 모의 실험시에는 m_1 과 m_2 대신에 $m_{1(real)}$ 과 $m_{2(real)}$ 이 사용된다.

본 제어성능 평가에서는 로봇 관절 θ_i 의 정착 제어를 목적으로 한다. 따라서 다음과 같은 두개의 안정된 슬라이딩 서피스를 설정한다.

$$\begin{aligned} s_1(t) &= c_1 e_1(t) + e_2(t) = 0, \quad c_1 > 0 \\ s_2(t) &= c_2 e_3(t) + e_4(t) = 0, \quad c_2 > 0 \end{aligned} \quad (15)$$

여기서,

$$\begin{aligned} e_1(t) &= \theta_1(t) - \theta_{d1}(t), \quad e_2(t) = \dot{\theta}_1(t) - \dot{\theta}_{d1}(t) = \dot{\theta}_1(t) \\ e_3(t) &= \theta_2(t) - \theta_{d2}(t), \quad e_4(t) = \dot{\theta}_2(t) - \dot{\theta}_{d2}(t) = \dot{\theta}_2(t) \end{aligned}$$

따라서, 도입된 로봇의 위치 정착제어를 위해 섭동추정이 없는 기존의 슬라이딩 모드 제어기 (SMC), Elmali 와 Olgac 가 제안한 SMCPE, 그리고 본 연구에서 제안된 SMCPEP 을 설계하면 다음과 같다.

1) SMC

$$\begin{aligned} u_1(t) &= u_{equ1} - k_1 \operatorname{sgn}(s_1(t)) - P_1 s_1(t), \quad k_1 > |\psi_1| \\ u_2(t) &= u_{equ2} - k_2 \operatorname{sgn}(s_2(t)) - P_2 s_2(t), \quad k_2 > |\psi_2| \quad (16) \\ u_{equ1} &= -c_1 e_2 - f_1 \\ u_{equ2} &= -c_2 e_4 - f_2 \end{aligned}$$

2) SMCPE

$$\begin{aligned} \hat{u}_1(t) &= u_{equ1} - \hat{k}_1 \operatorname{sgn}(s_1(t)) - P_1 s_1(t) - \psi_{est1}, \\ \hat{k}_1 &> |\psi_{error1}| \\ \hat{u}_2(t) &= u_{equ2} - \hat{k}_2 \operatorname{sgn}(s_2(t)) - P_2 s_2(t) - \psi_{est2}, \quad (17) \\ \hat{k}_2 &> |\psi_{error2}| \\ \psi_{est1}(t) &= \dot{e}_{2(calculated)}(t) - f_1(t) - \hat{u}_1(t - \delta) \\ \psi_{est2}(t) &= \dot{e}_{4(calculated)}(t) - f_2(t) - \hat{u}_2(t - \delta) \end{aligned}$$

3) SMCPEP

$$\begin{aligned} \hat{u}_1(t) &= u_{equ1} - \hat{k}_1 \operatorname{sgn}(s_1(t)) - P_1 s_1(t) - \psi_{est1}, \\ \hat{k}_1 &> |\psi_{error1}| \\ \hat{u}_2(t) &= u_{equ2} - \hat{k}_2 \operatorname{sgn}(s_2(t)) - P_2 s_2(t) - \psi_{est2}, \\ \hat{k}_2 &> |\psi_{error2}| \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \psi_{average1}(t) &= \frac{s_1(t) - s_1(t - N \cdot \delta)}{N \cdot \delta} \\ &+ \frac{\sum_{n=1}^N (\hat{k}_1 \operatorname{sgn}(s_1(t - n \cdot \delta)) + P_1 s_1(t - n \cdot \delta))}{N} \\ &+ \frac{\sum_{n=1}^N (u_{equ1}(t - (n-1) \cdot \delta) - u_{equ1}(t - n \cdot \delta))}{2 \cdot N} \\ &+ \psi_{est1}(t - N \cdot \delta) \quad (18) \\ \psi_{average2}(t) &= \frac{s_2(t) - s_2(t - N \cdot \delta)}{N \cdot \delta} \\ &+ \frac{\sum_{n=1}^N (\hat{k}_2 \operatorname{sgn}(s_2(t - n \cdot \delta)) + P_2 s_2(t - n \cdot \delta))}{N} \\ &+ \frac{\sum_{n=1}^N (u_{equ2}(t - (n-1) \cdot \delta) - u_{equ2}(t - n \cdot \delta))}{2 \cdot N} \\ &+ \psi_{est2}(t - N \cdot \delta) \\ \psi_{est1}(t) &= 2 \cdot \psi_{average1}(t) - \psi_{average1}(t - N \cdot \delta) \\ \psi_{est2}(t) &= 2 \cdot \psi_{average2}(t) - \psi_{average2}(t - N \cdot \delta) \end{aligned}$$

4. 시뮬레이션 결과 및 고찰

공칭시스템(nominal system)의 경우 링크길이 a_i 와 질량 m_i 를 각각 1 로 설정하였으며, 시스템에 주어진 외란과 불확실성은 다음과 같이 부가하였다.

$$\begin{aligned} d_1(t) = d_2(t) &= 2.5 \sin(2\pi t) + 1.5 \cos(4.5\pi t) \quad (19) \\ m_{1(real)} &= 0.9, \quad m_{2(real)} = 1.1 \end{aligned}$$

그리고 3 가지 제어기의 성능비교를 위해 다음과 같은 제어 변수를 설정하였다.

$$\begin{aligned} k_1 = k_2 = \hat{k}_1 = \hat{k}_2 &= 5, \quad c_1 = c_2 = 4 \quad (20) \\ \delta &= 0.005 \text{ 초}, \quad P_1 = P_2 = 5, \quad N = 2 \end{aligned}$$

컴퓨터 모의 실험시 $N=2$ 로 설정하였기 때문에 SMCPE 는 200Hz 로 섭동 샘플링을 하고 있으며, SMCPER 은 100Hz 로 샘플링하는 경우가 된다. 우선 외란을 주지 않은 상태에서의 질량 불확실성에 의한 섭동추정 성능을 보면 Fig. 2 와 같다. SMCPER 의 경우 안정된 상태에 들어간 후 불연속점 없이 거의 영(zero)에 수렴하고 있지만 SMCPE 의 경우는 \dot{x}_2 의 불연속으로 인하여 심한 떨림 현상이 발생하고 있다. 이러한 현상은 Fig. 3 에서 보는 바와 같이 외란을 추가한 섭동추정 결과에서도 나타난다. 이러한 섭동추정에 있어서의 오차 및 떨림 현상은 관절 위치제어의 정확도에

직접적으로 영향을 주게된다. Fig. 4 는 요구 관절 위치를 $\theta_{1(d)} = \theta_{2(d)} = \frac{\pi}{4}$ (rad)으로 설정하였을 경우의 3 가지 제어기의 정착위치제어 결과를 비교한 것이다. 예상한 대로 본 연구에서 제안한 SMCPER 의 경우가 가장 우수한 위치제어 결과를 보이고 있다. Fig. 4 의 제어 결과를 얻기 위해 공급된 제어입력은 제어기내에 부호함수가 포함되어 있기 때문에 3 가지 제어기 모두 떨림 현상이 발생한다. 이러한 현상을 줄이기 위해 부호함수 대신 포화함수를 사용할 수 있으며, 이 경우에도 Fig. 5 에서 보는 바와 같이 유사한 제어 결과를 나타내고 있다. 확대된 제어입력에서 알 수 있듯이 SMCPER 은 SMCPE 에 비하여 섭동추정 주기가 반으로 나타나고 있다.

다음은 본 연구에서 제안한 SMCPER 의 제어 성능을 보다 구체적으로 고찰하고자 두가지 다른 제어제인을 사용하여 제어성능을 평가하였다. Fig. 6 은 제어제인이 $5(\hat{k}_1 = \hat{k}_2)$ 인 경우, $1(\hat{k}_1 = \hat{k}_2)$ 인 경우의 제어결과 비교이다. 제어제인이 작은 경우 제어 초기 적은 입력이 공급되지만 정착 시간에 있어 약간 늦을 뿐 위치제어 정확도 측면에서는 거의 유사한 결과를 보이고 있다. 한편 제 2 절에서 언급한 바와 같이 본 연구에서 제안한 SMCPER 은 N 값에 따라서 제어성능이 변화된다. Fig. 7 은 N 값의 변화에 따라 제어성능을 비교한 결과로서 N 이 증가함에 따라 제어성능이 약간씩 저하됨을 쉽게 알 수 있다. $N=4$ (섭동추정 샘플링 : 50Hz) 까지는 기존의 SMCPE(섭동추정 샘플링 : 200Hz)에 비해 우수한 제어결과를 보이며

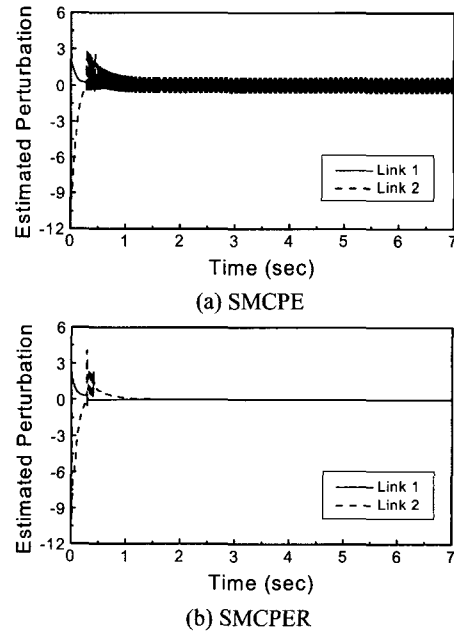
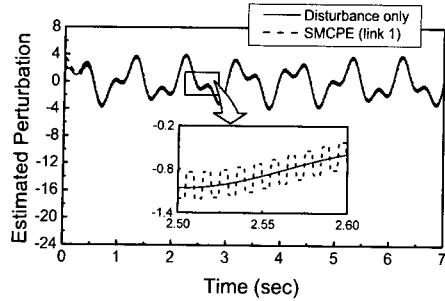
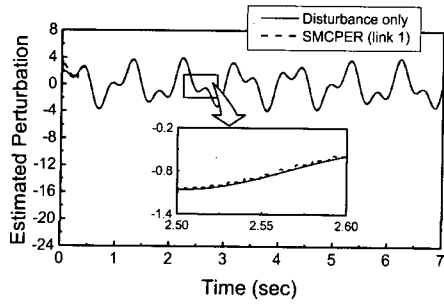


Fig. 2 Perturbation estimation due to mass uncertainties

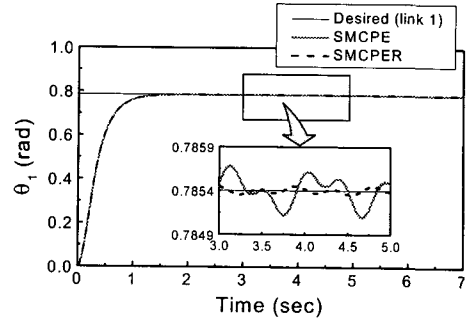


(a) SMCPE

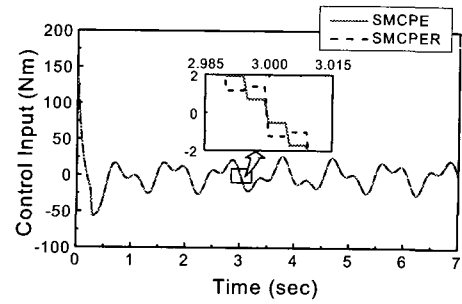


(b) SMCPEr

Fig. 3 Perturbation estimation in the presence of disturbance and mass uncertainties

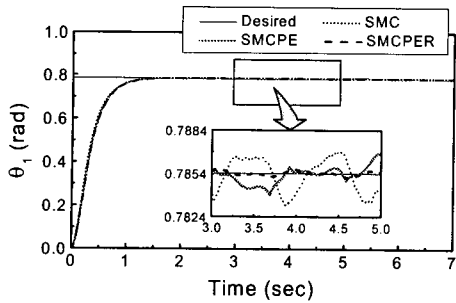


(a) Control response

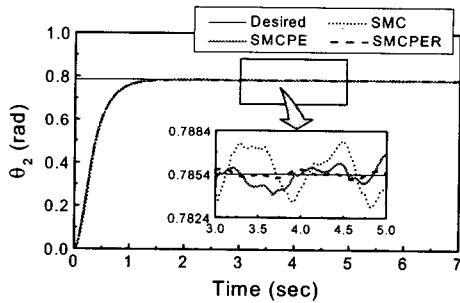


(b) Control input

Fig. 5 Comparison of control performance with saturation function in the controller

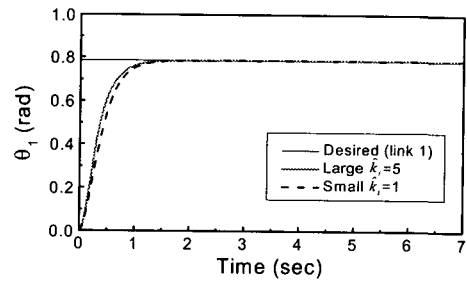


(a) Link 1

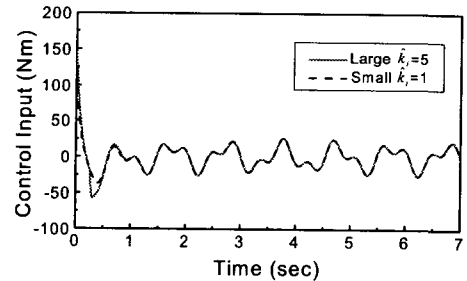


(b) Link 2

Fig. 4 Comparison of control performance with signum function in the controller



(a) Control response



(b) Control input

Fig. 6 Control responses with large and small gains

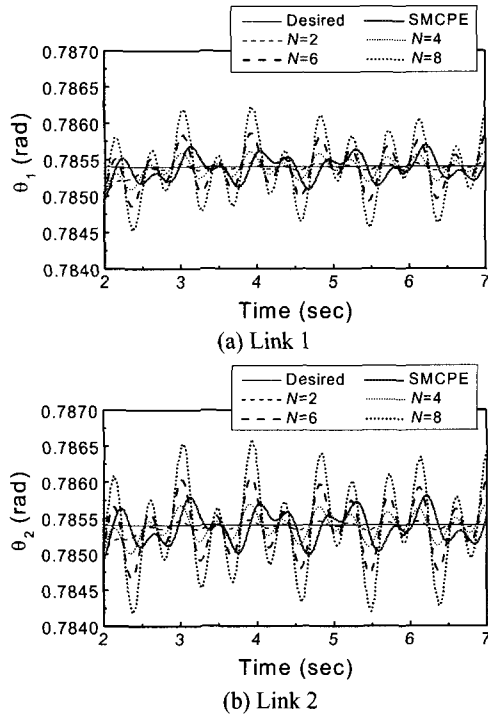


Fig. 7 Comparison of control responses with different perturbation sampling time

$N = 6$ 일 경우부터는 SMCPE 보다 악화된다. 다시 말하면 SMCPE의 경우 섭동 추정이 50Hz 이하로 수행되고 있어 200Hz로 추정하고 있는 SMCPE에 비해 성능이 하락됨을 의미한다. 또한, 지나치게 큰 N 값은 적분 계산량의 증대에도 영향을 미치게 된다. 따라서 본 연구에서 제안한 SMCPE는 제어하고자 하는 시스템에 들어있는 섭동(외란 및 불확실성)의 주파수와 적분 계산량을 고려한 알맞은 N 값의 선택으로 실제 구현 시 많은 장점을 가져올 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 시스템 매개변수의 불확실성과 외란이 존재하는 제어시스템의 강건제어를 위해 새로운 형태의 섭동 추정기를 갖는 슬라이딩 모드 제어기를 제안하였다. SMCPE로 명명된 이 제어기는 특정한 시간 동안의 적분 평균값을 사용하기 때문에 샘플링 시간에 덜 민감하며, 제어주기와 섭동주기의 비를 조절함으로써 센서를 비롯한 각종 하드웨어 성능에 맞출 수 있는 유연성을 갖고 있다. 이러한 장점을 보이기 위해 2 링크 로봇시스템의 위치정착제어를 실시한 결과 본 연구에서 제안된 SMCPE가 기존의 SMCPE에 비하여 보다

정확한 섭동추정이 이루어졌으며 이로 인한 보다 정확한 위치제어가 수행되었다. 본 연구에서 제안한 SMCPE는 위치정착제어 뿐만 아니라 각종 추적제어(tracking control)에도 쉽게 확장 사용될 수 있다.

참고문헌

- (1) Slotine, J. J. E. and Sastry, S. S., 1983, "Tracking Control of Nonlinear Systems Using Sliding Surfaces with Application to Robot Manipulators," *International Journal of Control*, Vol. 38, No. 2, pp. 465~492.
- (2) Young, K. K. D., 1978, "Controller Design for Manipulator Using Theory of Variable Structure Systems," *IEEE Transactions on System, Man and Cybernetics*, Vol. 8, No. 2, pp. 101~109.
- (3) Choi, S. B. and Park, D. W., 1993, "Fast Tracking Control via Moving Sliding Surfaces," *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers*, Vol. 17, No. 3, pp. 624~634.
- (4) Park, D. W. and Choi, S. B., 1999, "Moving Sliding Surfaces for High-Order Variable Structured Systems," *International Journal of Control*, Vol. 72, No. 11, pp. 960~970.
- (5) Kozek, M., Puchhammer, G. and Jorgl, M. P., 1994, "A MIMO Sliding Mode Control for a High Speed EMS MAGLEV-Vehicle using Disturbance Estimation," *Proc. of the 1994 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 587~592.
- (6) Lu, Y. S. and Chen, J. S., 1995, "Design of a Perturbation Estimator Using the Theory of Variable-Structure Systems and Its Application to Magnetics Levitation Systems," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 42, No. 3, pp. 281~289.
- (7) Liu, C. S. and Peng, H., 2000, "Disturbance Observer Based Tracking Control," *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 122, No. 2, pp. 332~335.
- (8) Elmali, H. and Olgac, N., 1992, "Sliding Mode Control with Perturbation Estimation (SMCPE) : A New Approach," *International Journal of Control*, Vol. 56, No. 4, pp. 923~941.
- (9) Elmali, H. and Olgac, N., 1996, "Implementation of Sliding Mode Control with Perturbation Estimation (SMCPE)," *IEEE Transaction on Control System Technology*, Vol. 4, No. 1, pp. 79~85.
- (10) Choi, S. B. and Park, D. W., 1994, "Moving Sliding Surfaces for Fast Tracking Control of Second-Order Dynamical Systems," *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 116, No. 1, pp. 154~158.
- (11) Sciavicco, L. and Bruno, S., 1996, "Modeling and Control of Robot Manipulators," *The McGraw-Hill Company*, New York.