

새로운 섭동 추정기를 갖는 슬라이딩 모드 제어기의 설계

함준호[†] · 최승복^{*}

Design of Sliding Mode Controller with New Perturbation Estimator

Joon-Ho Ham[†] and Seung-Bok Choi^{*}

Key Words : Disturbance(외란), Estimator(추정기), Perturbation (섭동), Sliding Mode Control(슬라이딩 제어), Uncertainty(불확실성)

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. This work also proposes two effective actuating methods of the perturbation estimator: on-off condition and filtering condition. 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. 서 론

대상 제어시스템의 매개변수변화 및 외란에 대하여 강건한 제어를 위해 지난 20 여년간 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 설계(over-conservative design)가 이루어 지고 있다. 특히, 제어강건성의 향상과 슬라이딩 평면까지 도달하는 리칭(reaching) 시간을 줄이기 위해 높은 제어 입력계인을 사용하면 심한 떨림(chattering) 현상이 발생하여 시스템 하드웨어 성능에 많은 문제점을

유발한다⁽²⁾.

이 떨림 현상은 시스템 제어 성능을 저하시키고, 시스템에 충격을 주어 수명을 단축시킨다. 따라서 입력계인의 증가를 피해야 하는데, 입력계인의 증가없이 제어강건성을 증가시키기 위한 방법은 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 첫번째 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 강건 제어를 수행하였으며, Liu 와 Peng⁽⁷⁾은 시스템 불

[†] 발표자, 인하대학교 대학원 기계공학과
E-mail : codefire@hanmail.net
TEL : (032) 872-7925 FAX : (032)868-1716

^{*} 인하대학교 기계공학과
E-mail : seungbok@inha.ac.kr
TEL : (032) 860-7319 FAX : (032)868-1716

확실성과 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 연구에서는 Choi 와 Ham 이 제안한 적분평균값을 이용한 섭동추정기⁽¹⁰⁾를 개선, 재설계하고 개선된 섭동추정기의 결과를 이용하여 제어 성능을 높이는 방법을 제안한다. 제안된 섭동추정기는 섭동추정의 샘플링 시간(sampling time)을 가변적으로 조정할 수 있게 하며 안정적인 섭동추정을 가능하게 한다. 그리고 테일러-전개(Taylor-series)를 이용하여 다음 제어 주기의 섭동을 예측함으로써 섭동추정의 정확성을 높인다. 또한 본 연구에서는 추정된 섭동을 이용하여 제어 성능과 시스템의 안정성을 향상시키는 2 가지 방법을 제안하였다. 이러한 방법을 EAM(estimator actuating method)이라 명명하였으며, 토크 외란과 질량 불확실성이 존재하는 2 링크 로봇 시스템을 채택하여 SMCPE 와 제안된 방법의 위치제어 성능에 대한 비교 연구를 수행하였다.

2. 섭동 추정기의 설계

시스템 변수변화와 외란이 들어오는 다음과 같은 일반적인 비선형 시스템을 고려한다.

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= F(x(t)) + Bu(t) + \Delta F(x(t)) + \Delta Bu(t) + d(t) \\ &= F(x(t)) + Bu(t) + \Psi(t), \\ \Psi(t) &= \Delta F(x(t)) + \Delta Bu(t) + d(t)\end{aligned}\quad (1)$$

상기식에서 $u(t)$ 는 제어입력, $d(t)$ 는 외란, 그리고 $\Delta f(\cdot)$ 와 Δb 는 시스템과 입력의 불확실성을 각각 나타낸다. 일반적인 슬라이딩 모드 제어를 구성하기 위한 첫번째 단계로서 다음과 같은 슬라이딩 서피스를 설정한다.

$$s(t) = Gx(t) \quad (2)$$

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

$$\begin{aligned}\dot{s}(t) &= GF(x(t)) + GBu(t) + G\Psi(t) \\ &= GF(x(t)) + GBu(t) + \psi(t), \\ \psi(t) &= G\Psi(t)\end{aligned}\quad (3)$$

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

$$\begin{aligned}u(t) &= (GB)^{-1}(u_{eq}(t) - k \cdot \text{sgn}(s(t)) - Ps(t)), \\ k &> \|\psi\|_{\max} \\ u_{eq}(t) &= -GF(x(t))\end{aligned}\quad (4)$$

상기식에서 k 와 P 는 각각 불연속 제어게인벡터와 비례제어게인벡터이며, $\text{sgn}(\cdot)$ 은 부호함수를 나타낸다. 식 (4)에서 알 수 있듯이 제어게인벡터 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 제어 시스템의 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.

$$u(t) = (GB)^{-1}(u_{eq}(t) - k \cdot \text{sgn}(s(t)) - Ps(t) - \psi_{est}(t)) \quad (5)$$

여기서,

$$\begin{aligned}k &> \|\psi_{error}\|_{\max} \\ \psi_{est}(t) &= \dot{x}_{(calculated)}(t) - F(x(t)) - Bu(t - \delta) \\ \dot{x}_{(calculated)}(t) &= \{x(t) - x(t - \delta)\} / \delta \\ \psi_{error}(t) &= \psi(t) - \psi_{est}(t)\end{aligned}\quad (6)$$

상기식에서 δ 는 제어샘플링시간을 나타낸다. 일반적으로 센서에서 측정된 $x(t)$ 값을 수치적으로 미분하여 섭동추정에 이용하고 있기 때문에 SMCPE 의 경우 섭동추정 성능이 센서 성능에 종속되며, 계측과 계산과정에서 불연속섭동 관측 결과가 나올 수 있다. 또한 δ 시간 동안 섭동추정에 사용된 값이 제어입력을 제외하고는 변수이기 때문에 δ 가 증가하게 되면 상대적으로 섭동추정 오차가 크게 증가한다.

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

$$\begin{aligned}\dot{s}(t) &= GF(x(t)) + u_{eq}(t) - k \cdot \text{sgn}(s(t)) \\ &\quad - Ps(t) - \psi_{est}(t) + \psi(t)\end{aligned}\quad (7)$$

상기식을 임의시간 $T - N \cdot \delta$ 에서 T 까지 적분을 수행하면 다음과 같다.

$$s(T) = s(T - N \cdot \delta) + \int_{T - N\delta}^T \dot{s}(t) dt \quad (8)$$

상기식에서 제어입력은 제어샘플링시간(δ) 동안 일정한 값을 가지며 이를 $\psi(t)$ 의 적분항에 대하여 정리하면 다음을 얻을 수 있다.

$$\int_{T-N\delta}^T \psi(t)dt = s(T) - s(T - N\delta) + \delta \cdot \left(\sum_{i=1}^N k \cdot \text{sgn}(s(T - i \cdot \delta)) + Ps(T - i \cdot \delta) + \psi_{est}(T - i \cdot \delta) \right) + \sum_{i=1}^N \int_{T-i\delta}^{T-(i-1)\delta} -GF(x(t)) - u_{eq}(T - i \cdot \delta) dt \quad (9)$$

상기식에서 좌변의 적분값과 동일한 값을 갖고 있는 상수를 다음과 같이 정의한다.

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

상기식은 $T - N \cdot \delta$ 에서 T 시간 동안 $\psi(t)$ 의 적분값과 동일한 적분값을 갖는 적분평균섭동 $\psi_{ave}(T)$ 를 정의한 것이다. 식 (9)에서 $GF(t)$ 를 포함한 항의 정확한 적분값은 얻기 어렵기 때문에 다음과 같은 근사식을 이용한다.

$$\sum_{i=1}^N \int_{T-i\delta}^{T-(i-1)\delta} -GF(x(t)) - u_{eq}(T - i \cdot \delta) dt = \delta \cdot \left(\sum_{i=1}^N \frac{u_{eq}(T - (i-1)\delta) - u_{eq}(T - i \cdot \delta)}{2} \right) = \delta \cdot \frac{(u_{eq}(T) - u_{eq}(T - N \cdot \delta))}{2} \quad (11)$$

식 (10)과 (11)을 식 (9)에 대입하여 정리하면 다음식을 얻을 수 있다.

$$\psi_{ave}(T) = \frac{s(T) - s(T - N\delta)}{N \cdot \delta} + \sum_{i=1}^N \left\{ \frac{k \cdot \text{sgn}(s(T - i \cdot \delta)) + Ps(T - i \cdot \delta)}{N} + \frac{\psi_{est}(T - i \cdot \delta)}{N} \right\} + \frac{u_{eq}(T) - u_{eq}(T - N \cdot \delta)}{2N} \quad (12)$$

상기식과 같이 제안된 추정기는 가변적인 추정샘플링시간 $N \cdot \delta$ 을 갖는다. 식 (12)와 같은 이전 제어 시간 동안 시스템에 작용한 섭동들을 Taylor 전개에 의해 다음 제어 시간 동안 시스템에 작용할 섭동 $\hat{\psi}_{est}^r(T + \delta)$ 을 다음과 같이 예측할 수 있다.

$$\hat{\psi}_{est}^r(T + \delta) = \sum_{i=0}^r \psi_{ave}^{(i)} \left(\frac{(N+1)\delta}{2} \right)^i / i! \quad (13)$$

상기식에서 r 은 Taylor 전개의 차수이다. 만약 식 (13)을 1 차까지 전개한다면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\hat{\psi}_{est}^1(T + \delta) = \psi_{ave}(T) + \frac{(N+1)}{2N} (\psi_{ave}(T) - \psi_{ave}(T - N \cdot \delta)) \quad (14)$$

3. 추정기 구동법

2장에서 설계된 섭동추정기를 그대로 사용할 수도 있겠지만 제어시스템의 안정성과 성능을 향상시키기 위해 본 연구에서는 2가지의 EAM을 제안하였다.

첫 번째 방법으로서 On-off switching 방법이다. 일반적인 외란추정기의 경우 일정 주파수 대역에서 외란 제거 성능이 저하된다⁽¹¹⁾. 제안된 추정기 또한 그러한 현상을 보인다⁽¹²⁾. 제안된 방법은 이러한 성능저하현상을 막아준다. On-off switching 방법을 위해 추정기의 성능평가지수가 필요하다. 만약 섭동추정기를 사용하지 않는다면 시스템에 영향을 주는 섭동은 $\psi(t)$ 이다. 만약 추정기를 사용한다면 이때 시스템에 영향을 주는 섭동은 실제 섭동 $\psi(t)$ 에서 예측한 섭동 $\hat{\psi}^r(t)$ 을 뺀 $\psi(t) - \hat{\psi}^r(t)$ 이다. 즉 $\psi(t)$ 와 $\psi(t) - \hat{\psi}_{est}^r(t)$ 을 적절히 비교하여 추정기를 작동하면 된다. 하지만 $\psi(t)$ 는 직접적으로 알아낼 수 없으므로 $\psi(t) \equiv \psi_{ave}(t) + \psi_{error}(t)$ 라고 근사화하여 다음과 같은 on-off 조건을 제안한다.

$$\left\{ \begin{array}{l} \psi_{est1}^r = 0, \\ \text{for } \sum_{i=0}^{N'} |\hat{\psi}_{est}^r(T - i \cdot \delta) - \psi_{ave}(T - i \cdot \delta)| > \eta \cdot \sum_{i=0}^{N'} |\psi_{ave}(T - i \cdot \delta)| \\ \psi_{est1}^r = \hat{\psi}_{est}^r(T + \delta), \\ \text{for } \sum_{i=0}^{N'} |\hat{\psi}_{est}^r(T - i \cdot \delta) - \psi_{ave}(T - i \cdot \delta)| < \eta \cdot \sum_{i=0}^{N'} |\psi_{ave}(T - i \cdot \delta)| \end{array} \right. \quad (15)$$

추정기를 끄는 경우 다음 과정에 전달할 결과 섭동에 0을 넣음으로서 결과적으로 제거될 섭동이 0이 되도록하여 추정기를 끈다. 추정기의 성능평가지수로 근사식을 썼기 때문에 그 근사식으로부터 오는 오차의 영향을 줄이기 위하여 N' 구간의 합과 η 라는 계수를 이용하였다. η 를 1보다 작게 설정하여 추정기를 사용하였을 때 제거되지 못한 섭동이 시스템에 작용한 섭동보다 작을 경우 추정기를 작동하게 한다.

두 번째로 방법은 추정된 섭동 중 제어성능에

도움이 되는 섭동을 선별하고 제어성능을 저하시키는 섭동만을 제거하도록 하여 제어성능을 향상시키는 방법이다. 이러한 방법을 “Perturbation Filtering(PF)”이라 명명하였다. 제어성능에 도움이 되는 섭동을 선택하는 기준으로 슬라이딩모드존 재 조건을 이용한다. 즉 $s(t)\psi(t) < 0$ 인 섭동은 굳이 제거하지 않음으로써 제어성능을 향상시킬 수 있다. $\psi(t)$ 는 알 수 없는 값이므로 첫번째 방법의 결과인 $\psi_{est1}^r(t)$ 를 이용하여 다음과 같은 filtering 조건을 제시한다.

$$\begin{cases} \psi_{est2}^r = 0 & , \text{for } \psi_{est1}^r s(T) < 0 \\ \psi_{est2}^r = \psi_{est1}^r & , \text{for } \psi_{est1}^r s(T) \geq 0 \end{cases} \quad (16)$$

상기식은 불연속적인 조건이기 때문에 슬라이딩 서피스 $s(t)$ 가 작을 경우 추정기의 제어입력에 떨림 현상이 나타나게 된다. 따라서 추정기의 제어입력이 연속적이 되도록 조정해 주어야 한다. 이를 위해 일단 식 (8)을 이용하여 다음 제어추정의 슬라이딩 서피스를 예측한다.

$$\begin{aligned} s^*(T + \delta) &= s(T) \\ &+ \int_T^{T+\delta} GF(x(t)) + GBu(t) + \psi(t)dt \\ &= s(T) + (-k \cdot \text{sgn}(s(T)) - Ps(T)) \\ &+ \psi_{est1}^r(T) - \psi_{est2}^r(T) \cdot \delta \end{aligned} \quad (17)$$

상기식은 $\psi(t) \cong \psi_{est1}^r(T)$ 와 $GF(x(t)) \cong -u_{eq}(T)$ 라는 가정과 $\psi_{est}(T) = \psi_{est2}^r(T)$ 조건을 이용하여 유도하였다. 식 (17)에 의해 예상된 슬라이딩 서피스 $s^*(T + \delta)$ 의 부호가 현재의 슬라이딩 서피스 $s(T)$ 와 부호가 다르다면 식 (16)의 조건이 불연속적으로 변화할 것임을 알 수 있다. 따라서 이 경우 다음과 같이 예상되는 슬라이딩 서피스가 0 이 되도록 추정기의 입력을 조정한다.

$$\begin{cases} \psi_{est3}^r = \frac{s(T)}{\delta} - k \cdot \text{sgn}(s(T)) \\ \quad - Ps(T) + \psi_{est1}^r, \\ \text{for } s^*(T + \delta)s(T) < 0 \\ \psi_{est3}^r = \psi_{est2}^r, \\ \text{for } s^*(T + \delta)s(T) \geq 0 \end{cases} \quad (18)$$

한편 제어 시스템에 입력포화(input saturation)가 존재하는 경우 우리가 제안한 추정기는 와인드업(windup)이라고 알려진 현상이 발생할 수 있다. 이것은 추정기가 입력포화에 의해 포화된 제어입력을 섭동으로 계산하기 때문이다. 따라서 이를 보상하는 다음과 같은 간단한 안티-와인드업

(anti-windup) 식을 제안하다.

$$\begin{cases} \psi_{est}(T) = \psi_{est3}^r(T) + u^* - u_{\max} \\ \text{for } u^* > u_{\max} \\ \psi_{est}(T) = \psi_{est3}^r(T) \\ \text{for } u_{\min} \leq u^* \leq u_{\max} \\ \psi_{est}(T) = \psi_{est3}^r(T) + u^* - u_{\min} \\ \text{for } u^* < u_{\min} \end{cases} \quad (19)$$

$$u^* = (GB)^{-1}(u_{eq}(T) - k \cdot \text{sgn}(s(T)) - Ps(T) - \psi_{est3}^r(T))$$

상기식의 결과인 $\psi_{est}(T)$ 를 이용하여 제어입력을 식 (5)에 제공한다.

4. 로봇 위치 제어에 적용

본 연구에서 제안한 방법의 우수성을 입증하기 위하여 Fig.1 과 같은 2 링크 강체로봇 시스템의 평면운동을 고려한다. 이 시스템의 운동 지배방정식은 다음과 같이 주어진다⁽¹³⁾.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \end{bmatrix} \\ &= F + B\tau + d = F + u + d \end{aligned} \quad (20)$$

상기식에서 f_i 와 d_i 는 각각 2 링크 강체로봇 시스템과 외란을 의미하며, 불확실성을 부가하기 실제 질량을 $m_{1(real)}$, $m_{2(real)}$ 이라 정의한다. 이렇게 하면 시스템 f_i 항과 입력항에 섭동이 추가된다. 따라서 제어기의 컴퓨터 모의 실험시에는 m_1 과 m_2 대신에 $m_{1(real)}$ 과 $m_{2(real)}$ 이 사용된다.

제어성능 평가에서는 로봇 관절 θ_i 가 요구관절위치 θ_d 를 추적하는 것으로 하여 다음과 같은

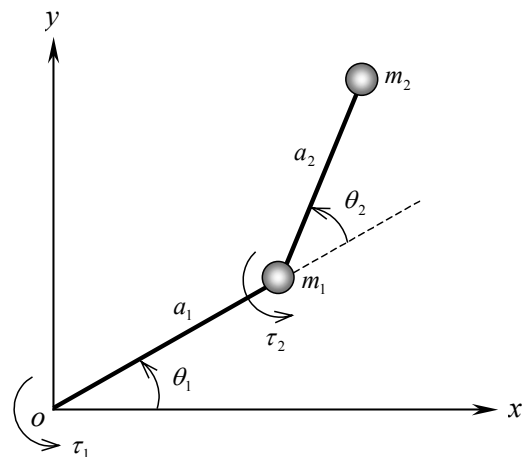


Fig. 1 A two-link planar manipulator

두개의 슬라이딩서피스를 설정하였다.

$$s = \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \end{bmatrix} = Ge \quad (21)$$

여기서,

$$G = \begin{bmatrix} c_1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c_2 & 1 \end{bmatrix}, \quad c_1 > 0, \quad c_2 > 0$$

$$e = \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \\ e_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta_1(t) - \theta_{d1}(t) \\ \dot{\theta}_1(t) - \dot{\theta}_{d1}(t) \\ \theta_2(t) - \theta_{d2}(t) \\ \dot{\theta}_2(t) - \dot{\theta}_{d2}(t) \end{bmatrix} \quad (22)$$

따라서 슬라이딩모드존재 조건 ($s(t)\dot{s}(t) < 0$)을 이용하여 본 연구에서 제안된 섭동추정제어를 설계할 수 있다.

5. 시뮬레이션 결과 및 고찰

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

$$d_1(t) = d_2(t) = 2.5 \sin(2\pi t) + 1.5 \cos(4.5\pi t) \quad (23)$$

$$m_{1(real)} = 0.9, \quad m_{2(real)} = 1.1$$

그리고 제어기의 성능비교를 위해 다음과 같은 제어변수를 설정하였다.

$$k_1 = k_2 = 5, \quad c_1 = c_2 = 4$$

$$\delta = 0.005, \quad P_1 = P_2 = 5, \quad N = 2 \quad (24)$$

Fig. 2는 요구관절위치를 $\pi/4(rad)$ 으로 설정하였을 경우의 3가지 제어기의 정착위치제어 결과를 비교한 것이다. 본 연구에서 제안한 방법이 가장 우수한 위치제어 결과를 보이고 있다.

Fig. 3은 제안된 추정기의 외란제거 성능을 보기 위해 여러 주기의 외란에 대하여 다음과 같은 성능 지수를 도시한 것이다. 이때 요구관절위치를 $0(rad)$ 으로 설정하였다.

$$M_n = \sqrt{\frac{\int_a^b \theta_n^2(t) dt}{b-a}}, \quad n = 1, 2 \quad (25)$$

$$y_n = 20 \log \frac{M_n}{M_{SMC}}, \quad n = 1, 2$$

상기식에서 n 은 각 링크를 나타낸다. 상기의 성능지수는 관절위치의 RMS(root mean square)로써 제어성능을 일반적인 SMC의 제어응답을 기준으로 데시벨 단위로 나타낸 것이다. 즉 상기 성능지수가 $-20dB$ 라는 것은 해당 주파수의 외란에 대한 관절의 위치의 RMS 값이 10 배만큼 적음을

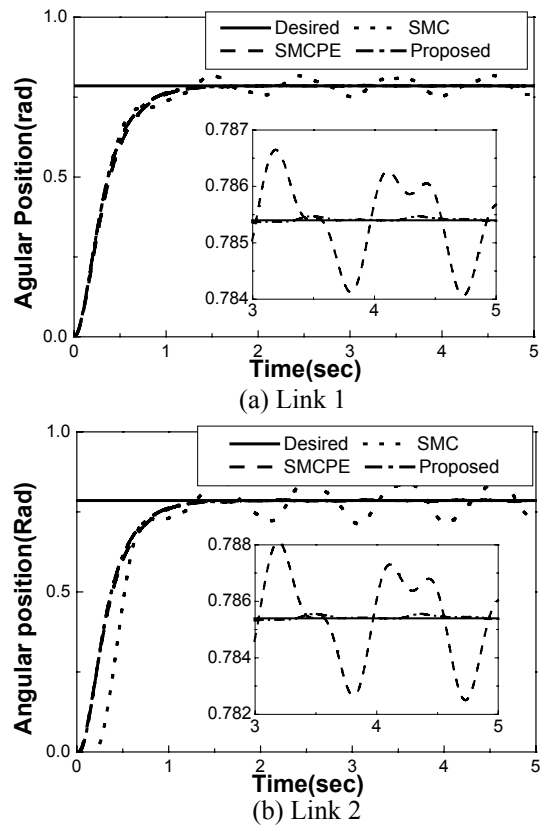


Fig. 2 Comparison of control performance

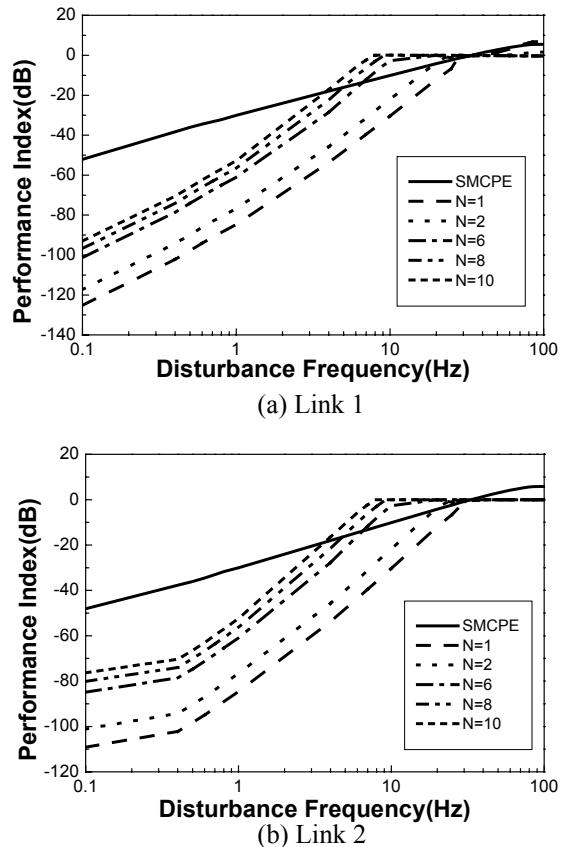


Fig. 3 Frequency response at various N

나타낸다. Fig. 3에서 보듯이 제안된 방법은 특히 저주파의 외란 제거 성능이 SMCPE 나 일반적인 SMC에 비해 매우 좋은 것을 알 수 있다. 또한 SMCPE는 일반적인 SMC와 비교하여 40Hz 이상의 고주파수의 외란이 시스템에 작용할 때 제어 성능이 떨어짐을 알 수 있다. 그러나 제안된 방법은 On-off switching 방법에 의하여 제어 성능이 저하되지 않는 것을 알 수 있다. 나아가서 섭동샘플링 시간을 조절함으로써 제어성능의 조율을 할 수 있는 유연성을 갖고 있다.

6. 결 론

본 연구에서는 시스템 매개변수의 불확실성과 외란이 존재하는 제어시스템의 강건제어를 위해 새로운 형태의 섭동 추정기를 갖는 슬라이딩 모드 제어를 제안하였다. 또한 추정기의 결과를 적절히 재처리함으로써 제어 성능과 안정성을 향상시킬 수 있는 방법을 제시하였다. 이러한 섭동 추정기는 강한 외란과 불확실성에 노출된 시스템이나 높은 정밀도를 요구하는 제어 시스템에 유용하게 활용될 것으로 기대된다.

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 Ham, J. H., 2004, "A new Perturbation Estimator in Variable Structure System with Application to Robot Control," *IMEchE Part D: Journal of Mechanical Engineering Science*, Vol. 218, No. 2, pp. 173-181
- (11) Choi, Y.G., Yang, K.G., Chung, W.K., Kim, H.R. and Suh, I.H., 2003, "On the Robustness and Performance of Disturbance Observers for Second-Order Systems," *IEEE Transaction on Automatic Control*, Vol. 48, No. 2, pp. 315-320
- (12) Choi, S. B., Ham, J. H. and Park, J.S., 2002, "Characteristics of a Sliding Mode Controller with Disturbance Estimator," *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 19, No. 1, pp. 165-171
- (13) Sciavicco, L. and Bruno, S., 1996, "Modeling and Control of Robot Manipulators," *The McGraw-Hill Company*, New York.