

제어이득의 하한을 이용한 새로운 슬라이딩 모드제어

Sliding Mode Control using the Lower Bound of Control Gain

유 병 국*
(Byung Kook Yoo)

Abstract : A new sliding mode control method based on the lower bound of control gain is presented. Although the magnitude of the proposed control input is larger than that of the conventional control input using both lower and upper bounds, the positive-negative exchanging chattering is reduced and reaching mode is shorter. Because the proposed scheme needs only the lower bound of control gain, it is applicable to the system whose upper bound of control gain is doubtful to determine such as the control gain depends on the system states. It is proved that the proposed control method guarantees the sliding condition. The analysis of differences between the conventional method and the proposed method is given. The validity of the proposed control strategy is shown through a 2nd-order nonlinear system example.

Keywords : sliding mode control, sliding condition, lower bound of control gain

I. 서론

일반적으로 슬라이딩 모드제어는 불확실성과 외란을 가진 시스템에 대한 강인한 특성을 가진 가변구조제어의 한 형태로 70년대부터 활발히 연구가 진행되어왔다[1-5]. 최근에 들어 많은 연구자들에 의해 채터링 문제[6,7], 비선형 스위칭 함수의 도입문제[8], 자기동조 경계층의 문제[9]등 여러 분야의 연구가 활발히 진행중이다. 특히 [10]에서는 가장 일반적으로 사용되고 있는 방식으로 비선형 시스템에 대한 제어이득의 상한과 하한을 이용하여 제어입력을 설계하는 방법이 제안되었다. 그러나 로봇 매니퓰레이터와 같은 대부분의 실제 시스템의 제어이득은 시스템 상태에 의존적이다. 따라서 주어진 시스템에 대한 제어이득의 상한을 결정하는 것, 특히 상태 의존적인 제어이득을 가진 시스템에 대한 상한의 결정은 그리 간단한 문제가 아니다. 물론 제어입력이 제한되어있지 않고 입력 채터링이 문제가 되지 않는다면 제어이득의 상한을 되도록 크게 설정하여도 무관할 것이다. 그러나 제어이득의 상한을 크게 설정하면 양과 음으로 변화하는 입력채터링이 발생되고 그 크기가 커지게 된다. 또한 제어이득의 상한 치의 설정에 따라 시스템의 제어응답은 달라지게 된다. 이렇게 기존의 일반적인 슬라이딩 모드제어는 상한과 하한을 모두 결정해야한다는 단점을 가지고 있다.

이러한 문제를 해결하는 방안의 하나로서 본 논문에서는 제어이득의 하한정보만을 이용하는 새로운 슬라이딩 모드제어방식을 제안한다. 이 방식은 기존의 방식에서의 상한과 하한의 기하평균치를 이용방법에 비하여 제어입력의 크기는 대체로 두 배 이상 증가하나 양과 음을 반복하는 채터링 현상은 줄어들고 또한 도달모드가 짧아지는 특성을 가지고 있다. 그리고 시스템의 제어이득에 대한 정보 중 하한만을 필요로 하기 때문에 시스템 상태에 의존적인 시스템과 같이 그 상한을 결정하기 어려운 시스템에 적용 가능하다. 제안된 제어법칙이 슬라이딩 조건을 만족함을 증명하며 기존의

제어입력과 제안된 제어입력에 대한 특성을 분석의 편의를 위해 특정 변수 값에 대한 가정 하에 비교 분석하였다. 그 타당성을 보이기 위해 제어이득이 시스템 상태에 의존적인 간단한 예제 시스템에 대한 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 그 결과를 비교 분석한다.

본 논문의 구성은 II장에서 일반 적인 방식인 입력이득의 하한 치와 상한 치의 기하평균을 이용한 방식에 대하여 2차 시스템을 이용하여 간단히 언급하고 III장에서는 하한만을 이용한 새로운 슬라이딩모드제어방식을 제안하며 이 제어입력이 슬라이딩 조건을 만족함을 증명한다. IV장에서는 간단한 2차 비선형 시스템 예제를 이용하여 제안된 방식의 타당성과 기존의 방식과의 비교를 보인다.

II. 기존의 슬라이딩 모드 제어방식

다음과 같은 2차 비선형 시스템을 고려하자.

$$\ddot{x}(t) = f(x) + g(x)u(t) \quad (1)$$

여기서 $f(x)$, $g(x)$ 는 연속함수이며 $u(t)$ 는 제어입력을 나타낸다. $x = [x \ \dot{x}]^T$ 는 상태벡터이며 $f(x)$ 에 대한 추정 가능한 함수를 $\mathcal{F}(x)$ 라하고 다음과 같은 조건을 가정할 수 있다.

$$|f(x) - \mathcal{F}(x)| \leq F(x) \quad (2)$$

여기서 $F(x)$ 는 알고있는 non-negative 함수이다. 그리고 일반적인 슬라이딩 모드제어방식에서는 제어이득 $g(x)$ 에 대한 상한과 하한을 알고 있다고 가정한다.

$$0 < g_{\min} \leq g(x) \leq g_{\max} \quad (3)$$

또한 제어입력에 사용될 제어이득으로서 $g(x)$ 의 추정 \hat{g} 를 상한과 하한의 기하평균치로 다음과 같이 정의한다[10].

$$\hat{g} = (g_{\min} g_{\max})^{1/2} \quad (4)$$

$x_d = [x_d \ \dot{x}_d]^T$ 를 추적하고자 하는 궤적이라 하면 추적 오차는 다음과 같이 정의될 수 있다.

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2002. 4. 17., 채택확정 : 2003. 5. 27.

유병국 : 한려대학교 멀티미디어정보통신공학과(bkyoo@hlu.hanlyo.ac.kr)

$$e = x - x_d = [e \ \dot{e}]^T \quad (5)$$

이 시스템에 대하여 안정한 슬라이딩모드제어를 위한 $s(e, t)$ 를 다음과 같이 설정한다.

$$s(e, t) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda \right) e(t) = \dot{e}(t) + \lambda e(t), \quad \lambda > 0 \quad (6)$$

$s(e, t) = 0$ 시변 평면을 $S(t)$ 라 정의하면, 모든 $t > 0$ 에 대하여 시스템 오차 궤적이 슬라이딩 평면 $S(t)$ 상에 남아있도록 하는 슬라이딩 조건은 다음과 같다.

$$\frac{1}{2} \frac{d}{dt} s^2 \leq -\eta |s|, \quad \eta > 0 \quad (7)$$

결국 (7)과 같은 조건을 만족하도록 제어입력을 설계해야 한다. 먼저 (6)으로 부터

$$\dot{s} = f(x) + g(x)u - \ddot{x}_d + \lambda \dot{e} \quad (8)$$

이다. 따라서 제어입력은

$$u = \hat{g}^{-1}(\hat{u} - k \operatorname{sgn}(s)), \quad \operatorname{sgn}(s) = \begin{cases} +1 & \text{if } s > 0 \\ -1 & \text{if } s < 0 \end{cases} \quad (9)$$

$$\hat{u} = -\ddot{f} + \ddot{x}_d - \lambda \dot{e}$$

이며 k 는 다음과 같은 조건을 만족하도록 설계한다.

$$k \geq \hat{g} g^{-1}(F + \eta) + |\hat{g} g^{-1} - 1| |\ddot{f} - \ddot{x}_d + \lambda \dot{e}| \quad (10)$$

이 때 $\beta = (g_{\max}/g_{\min})^{1/2}$ 로 하면 다음과 같이 표현 가능하다.

$$k \geq \beta(F + \eta) + (\beta - 1)|\hat{u}| \quad (11)$$

(8), (9)와 (10) 또는 (11)에 의하여 다음과 같이 슬라이딩 조건 (7)을 만족하게 된다.

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \frac{d}{dt} s^2 &= ((f - g \hat{g}^{-1} \ddot{f}) + (1 - g \hat{g}^{-1})(-\ddot{x}_d + \lambda \dot{e}))s \\ &\quad - g \hat{g}^{-1} k |s| \\ &\leq -\eta |s| \end{aligned} \quad (12)$$

이러한 기존의 제어방식에서는 (3)과 (4)에서와 같이 제어이득의 상한과 하한을 이용하는 방식이다. 다음 장에서는 단지 제어이득에 대한 하한 정보만을 이용하는 슬라이딩 모드 제어방식을 제안한다.

III. 제어이득의 하한 치만을 이용한 슬라이딩 모드 제어

본 장에서는 제어이득의 상한과 하한을 필요로 하는 앞의 방식과는 다르게 제어이득의 하한만을 이용하는 방식을 제안한다. 먼저 다음과 같이 가정한다.

가정 1 : (1)과 같은 시스템에서 제어이득은 다음 조건을 만족한다.

$$\begin{aligned} 0 < g_{\min} &\leq g(x) \\ g(x) &= g_{\min} + \Delta g(x) \end{aligned} \quad (13)$$

여기서 g_{\min} 는 제어이득 $g(x)$ 의 하한이며 알고있는 상수

이다. 그리고 $\Delta g(x)$ 는 알지 못하는 양의 비선형 함수이다.

정리 1 : (1)과 같은 시스템이 가정 1을 만족하고 (2)를 만족하는 F 가 존재하며 슬라이딩 평면을 (6)과 같이 설정한다면 다음과 같은 제어입력은 슬라이딩 조건 (7)을 만족한다.

$$u = g_{\min}^{-1}(\zeta - |\zeta| \operatorname{sgn}(s)) \quad (14)$$

여기서 $\zeta = -\ddot{f} + \ddot{x}_d - \lambda \dot{e} - k \operatorname{sgn}(s)$ 이며 k 는 다음과 같다.

$$k \geq F + \eta \quad (15)$$

증명 : 먼저 \dot{s} 를 전개하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{s} &= f + gu - \ddot{x}_d + \lambda \dot{e} \\ &= f + g[g_{\min}^{-1}(\zeta - |\zeta| \operatorname{sgn}(s))] - \ddot{x}_d + \lambda \dot{e} \\ &= f + \zeta - |\zeta| \operatorname{sgn}(s) + \Delta g g_{\min}^{-1} \zeta \\ &\quad - \Delta g g_{\min}^{-1} |\zeta| \operatorname{sgn}(s) - \ddot{x}_d + \lambda \dot{e} \\ &= f - \ddot{f} - k \operatorname{sgn}(s) - |\zeta| \operatorname{sgn}(s) \\ &\quad + \Delta g g_{\min}^{-1} \zeta - \Delta g g_{\min}^{-1} |\zeta| \operatorname{sgn}(s) \end{aligned} \quad (16)$$

따라서

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \frac{d}{dt} s^2 &= s(f - \ddot{f}) - k |s| - |s| |\zeta| + s \Delta g g_{\min}^{-1} \zeta \\ &\quad - |s| \Delta g g_{\min}^{-1} |\zeta| \\ &\leq s(f - \ddot{f}) - (F + \eta) |s| \\ &= s(f - \ddot{f}) - F |s| - \eta |s| \\ &\leq -\eta |s| \end{aligned} \quad (17)$$

이며 슬라이딩 조건 (7)을 만족한다. ■

제안된 방식의 제어입력 (14)는 ζ 의 부호와 s 의 부호 둘 다에 의하여 제어입력이 결정된다. 즉, ζ 의 부호와 s 의 부호가 같은 경우에는 제어입력이 영이 되며 부호가 다른 경우에만 제어입력이 인가된다는 것을 알 수 있다. 이러한 기존의 제어방식과 제안된 제어방식의 입력 특성 비교를 위하여 다음과 같은 정리를 살펴본다.

정리 2 : (2)에서의 \ddot{f} 와 F , (6)에서 λ , 그리고 (3)과 (13)의 g_{\min} 을 갖게 놓고 제어입력 (9)를 u_{conv} 로, 제어입력 (14)를 u_{prop} 로 나타내자. 그리고 (15)에서의 k 를 (11)과 같이 설정하였다고 가정한다. 이 때 동일한 상태 x 에 대하여 기존의 제어입력 (9)와 제안된 제어입력 (14)는 다음 관계를 만족한다.

$$u_{prop} = \begin{cases} 2\beta u_{conv}, & \text{if } \operatorname{sgn}(s) \neq \operatorname{sgn}(\zeta) \\ 0, & \text{if otherwise} \end{cases} \quad (18)$$

증명 : 먼저 (9)의 입력을 u_{conv} 로, (14)의 입력을 u_{prop} 로 놓는다. (14)에서 s 와 ζ 의 부호가 같은 경우에는 $u_{prop} = 0$ 은 자명하다. 다음의 두 가지의 경우에 대하여 살펴본다. 먼저 가정에서 (15)의 k 를 (11)과 같게 설정하였으므로, (11)의 k 는 $\beta \geq 1$ 이므로 (15)의 조건을 만족하게 된다. 따라서 (14)에서의 ζ 는 $\zeta = -\ddot{f} + \ddot{x}_d - \lambda \dot{e} - k \operatorname{sgn}(s) = \hat{u} - k \operatorname{sgn}(s)$ 로 표현될 수 있다. 즉,

$$\zeta = \hat{g} u_{conv} \quad (19)$$

따라서

a. $\zeta > 0, s < 0$ 인 경우

$$u_{prop} = g_{min}^{-1}(\zeta + |\zeta|) = 2g_{min}^{-1}\zeta = 2g_{min}^{-1}\hat{g}u_{conv} = 2\beta u_{conv} > 0 \quad (20)$$

b. $\zeta < 0, s > 0$ 인 경우

$$u_{prop} = g_{min}^{-1}(\zeta - |\zeta|) = 2g_{min}^{-1}\zeta = 2g_{min}^{-1}\hat{g}u_{conv} = 2\beta u_{conv} < 0 \quad (21)$$

이며 여기서 $\beta \geq 1$ 이다. 결국 (20)과 (21)에 의해 (18)과 같이 표현된다. ■

정리 2로부터 제안된 제어입력이 기존의 방식의 입력보다 두 배 이상 크다는 것을 알 수 있다. 즉, 두 배 이상이며 기존 방식에서의 β 에 따라 (g_{max} 의 설정에 따라) 그 이상으로 커질 수 있다. 물론 두 가지 제어방식에서 k 를 같게 놓았다는 가정을 했기 때문에 각각의 방식에서 k 를 각각 (11)과 (15)의 부등식을 만족하는 가장 작은 것으로 설정한 경우에는 정리 2를 보장하지 못한다. 그러나 기존의 제어입력은 스위칭 입력을 포함하고 있기 때문에 양과 음으로의 채터링이 발생할 수 있으나 제안된 제어방식은 입력이 ζ 의 부호에 대한 조건에 의하여 대부분 영이 되거나 같은 부호 내에서의 채터링이 발생하는 특징을 나타낼 수 있다.

일반적으로 입력의 크기가 너무 크면 도달모드가 짧아지는 장점이 있으나 물리적으로 구현하기 어렵다는 단점이 있다. 즉, 입력과 도달모드의 시간과는 trade-off 관계를 보인다. 그러나 본 논문에서 제안한 방식은 큰 입력을 갖기는 하나 양과 음의 교차 채터링이 아니라 단일 부호 내에서의 채터링만을 보인다. 일반적으로 양과 음의 채터링은 실제 구현 시 시스템의 평형점 부근에서 고주파 진동을 나타내게 되거나 모델화 되지 않은 고주파 동특성을 발생시키고 작동기(actuator)의 물리적 한계에 의한 문제점을 발생시킨다. 예를 들면 DC모터 제어에서 양과 음의 무한속도 교차 입력은 전류가 그 입력이기 때문에 이 전류의 양과 음의 무한속도 교차가 되어야 하는데 이것은 모터 권선의 인덕턴스 때문에 불가능하게 되며 또한 모터의 수명단축이나 파손의 원인이 되기도 한다는 것이다. 따라서 본 논문에서 제안한 제어방식이 기존의 방식보다 제어입력의 크기는 2 배 이상 증가하나 기존의 방식에 비하여 이러한 문제점은 나타나지 않는다.

Remark 1 : 제안된 제어방식은 $x^{(n)} = f(x) + g(x)u$, $x = (x, \dot{x}, \dots, x^{(n-1)})^T$ 와 같은 n -차 시스템으로 확장 가능하며 이 때 $s(x, t) = \left(-\frac{d}{dt} + \lambda\right)^{n-1} e$, $\lambda > 0$, $e = x - x_d$ 이며 이 때의 제어입력 (14)는 다음과 같이 표현된다.

$$u = g_{min}^{-1}(\zeta - |\zeta|sgn(s))$$

$$\zeta = -\ddot{y} + \ddot{x}_d^{(n)} - \sum_{i=1}^{n-1} c_i e^{(i)} - ksgn(s) \quad (22)$$

$$k \geq F + \eta$$

여기서 c_i 는 $h(p) = p^n + c_{n-1}p^{n-1} + \dots + c_1$ 이 안정하도록 하는 실계수들이며 여기서 p 는 라플라스 연산자이다.

IV. 컴퓨터 시뮬레이션

본 장에서는 제어이득의 하한만을 이용한 슬라이딩 모드 제어 방식을 [10]의 예제를 응용한 다음과 같은 예제 시스템에 대하여 컴퓨터 시뮬레이션 결과를 보이며 제어이득의 하한과 상한을 모두 필요로 하는 기존의 방식과의 비교를 통하여 그 타당성을 살펴본다.

$$\dot{x} + (|\sin(t)| + 1)x^2 \cos(3x) = (0.5 \cos(3t) + 2.5 + |x|)u \quad (23)$$

여기서 $\ddot{y} = -1.5 \dot{x}^2 \cos(3x)$ 로 놓고 $F = 0.5 \dot{x}^2 |\cos(3x)|$ 으로 할 수 있다. 만약 이러한 시스템에 대하여 기존의 방식과 같이 상한과 하한 모두를 이용하여야 한다면 $g(x, t)$ 에 대하여 상한을 설정하기 어렵다. 이는 (23)에서 $g(x, t)$ 가 상태 x 를 변수로 하고 있기 때문이다. 그러나 본 논문에서의 방식에서는 이러한 상한을 필요로 하지 않고 하한만을 이용하므로 예제 시스템에 대한 하한치 $g_{min} = 2.0$ 만을 이용한다. 그리고 원하는 궤적은 $x_d = \sin(\pi t/2)$ 로 설정하였으며 또한 슬라이딩 평면 (6)의 설계에서 $\lambda = 3.0$ 으로, $\eta = 0.1$ 로 하였다. 결국 제어입력은 (14)과 (15)로부터 다음과 같이 설계된다.

$$u = 0.5(\zeta - |\zeta|sgn(s))$$

$$\zeta = 1.5 \dot{x}^2 \cos(3x) + \ddot{x}_d - 3\dot{e} - ksgn(s) \quad (24)$$

$$k = 0.5 \dot{x}^2 |\cos(3x)| + 0.1$$

기존의 상한과 하한을 이용하는 방식에서의 제어법칙은 (9)와 (11)로부터 다음과 같이 설계될 수 있다.

$$\ddot{y} = -1.5 \dot{x}^2 \cos(3x)$$

$$F = 0.5 \dot{x}^2 |\cos(3x)|$$

$$\hat{u} = -\ddot{y} + \ddot{x}_d - 3\dot{e} \quad (25)$$

$$k = \beta(F + 0.1) + (\beta - 1)|\hat{u}|$$

$$u = \hat{x}^{-1}(\hat{u} - ksgn(s))$$

여기서 $\hat{g} = (g_{min} g_{max})^{1/2}$ 이며 $\beta = (g_{max} / g_{min})^{1/2}$.

그림 1은 원하는 상태 궤적과 제안된 제어방식 (14), 그

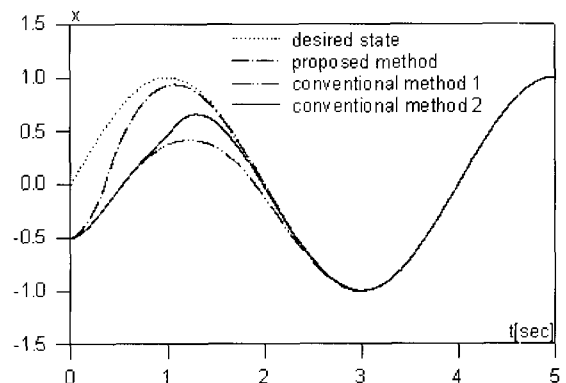
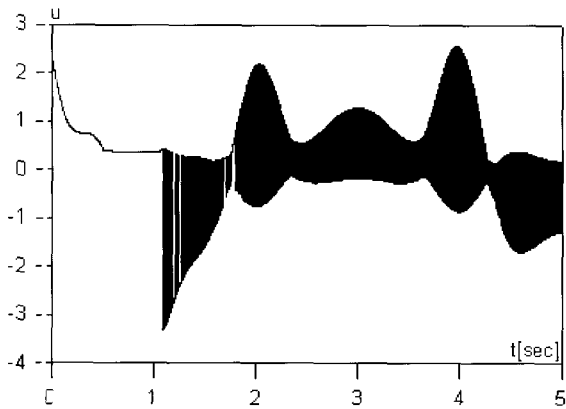


그림 1. 제안된 제어방식과 기존방식의 비교.

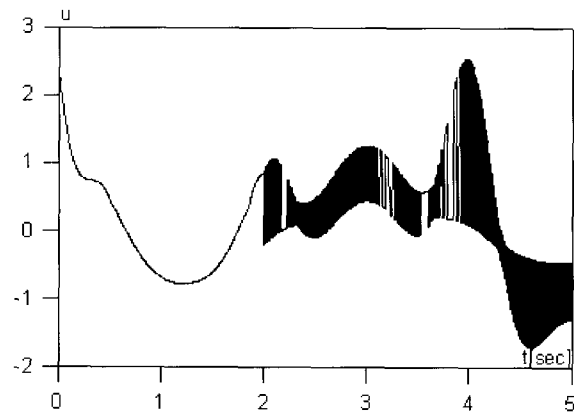
(CM.1 : $g_{max} = 4$, CM.2 : $g_{max} = 10$)

Fig. 1. Comparison between the proposed method and the conventional method.

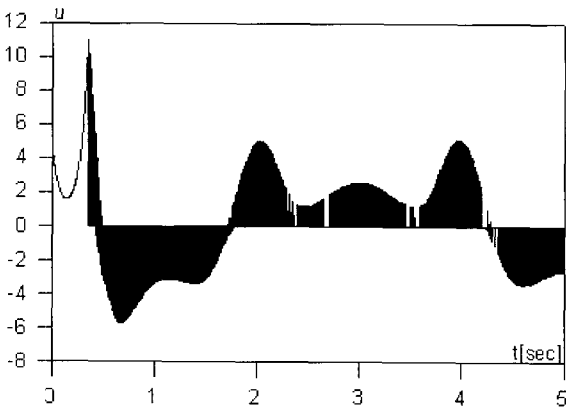
(CM.1 : $g_{max} = 4$, CM.2 : $g_{max} = 10$)



(a) 제안된 방식에서의 제어입력, (14)



(b) 기존 방식의 제어입력($g_{\max} = 4$)



(c) 기존 방식의 제어입력($g_{\max} = 10$)

그림 2. 각 방식에 대한 제어입력.

Fig. 2. Inputs of each control method.

리고 기존의 제어방식 (9)에 대한 결과를 비교하고 있으며 여기서 conventional method 1은 $g_{\max} = 4.0$ 로, conventional method 2는 $g_{\max} = 10.0$ 로 설정한 것이다. 이 때 초기 상태는 $[x_d(0), \dot{x}_d(0)]^T = [-0.5, 0.0]^T$ 로 하였다. 그림 2는 각각의 경우에 대한 입력을 나타내었다. 본 시뮬레이션으로부터 제안된 방식이 기존의 방식보다 좀더 향상된 제어 성능을 나타냄을 확인할 수 있다. 정리 2의 내용을 정확히 확

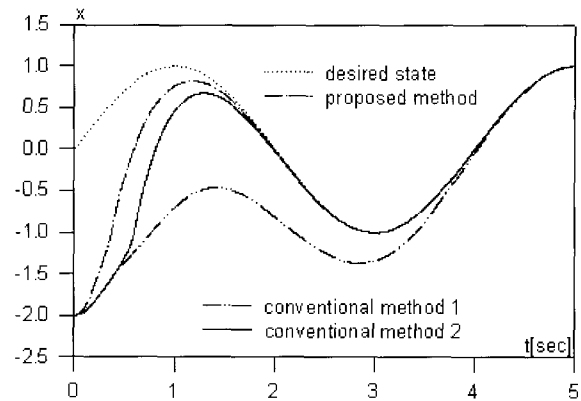


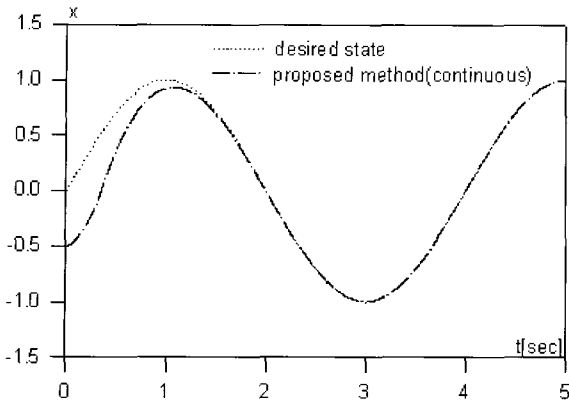
그림 3. 제안된 제어방식과 기존방식의 비교.

(CM.1 : $g_{\max} = 4$, CM.2 : $g_{\max} = 10$)

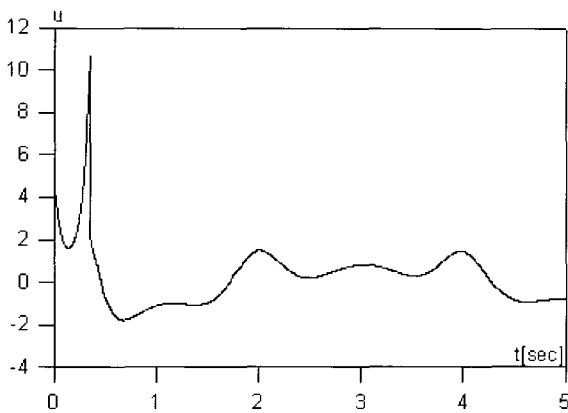
Fig. 3. Comparison between the proposed method and the conventional method.

(CM.1 : $g_{\max} = 4$, CM.2 : $g_{\max} = 10$)

인 하기는 어렵지만 그림 2(a), 즉 제안된 방식의 제어입력은 그림 2(b)와 (c)와 같은 기존의 방식보다 정상상태에서 제어입력이 대체로 2배 이상 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이 크기는 β 에 따라 2배 이상에서 최대 $2\sqrt{5}$ 배 ($2 \cdot \sqrt{g_{\max}/g_{\min}} = 2\sqrt{10/2} \approx 4.47$ 또는 $2\sqrt{4/2} \approx 2.82$ 배)까지 나타날 수 있다. 특히 그림 2(a)에서는 제어입력이 대체로 영 또는 같은 부호 내에서 채터링 되고 있음을 알 수 있다. 이것은 정리 2에서 살펴본 바와 같다. 또한 그림 1과 그림 2(a)에서 제안된 제어방식은 초기에서부터 큰 입력이 인가됨에 따라 기존의 방식보다 reaching mode가 짧고 빠르게 수렴되고 있음을 확인할 수 있다. 또한 그림 2(b)와 (c), 그리고 그림 1에서 g_{\max} 값의 설정에 따라 시스템의 응답 특성이 달라짐을 알 수 있다. 그림 3은 같은 조건 하에서 초기 상태를 $[x_d(0), \dot{x}_d(0)]^T = [-2.0, 0.0]^T$ 로 설정한 경우의 결과를 각 방식에 대하여 비교하고 있다. 여기서 제안된 방식(proposed method)과 기존의 방식에서 $g_{\max} = 10.0$ 으로 설정한 경우(conventional method 2)에는 거의 유사한 시간에 수렴되지만 $g_{\max} = 4.0$ 으로 설정한 경우(conventional method 1)에는 수렴이 매우 느리게 나타남을 알 수 있다. 이것은 (22)와 같은 시스템에서 초기 상태에 대한 제어이득의 상한, 즉 $g_{\max}|_{x=x(0)} = 0.5 + 2.5 + 2.0 = 5.0$ 인데 제어입력에서 $g_{\max} = 4.0$ 으로 설정하였기 때문이다. 따라서 상한과 하한을 모두 이용하는 방식인 기존의 제어방식에서 제어이득의 상한을 결정하기 용이한 상태에서는 관계없으나 상한을 결정하기 어려운, 다시 말해 시스템 상태에 의존적인 제어이득을 가진 경우에는 g_{\max} 의 설정에 대하여 매우 민감하다는 것을 알 수 있다. 그렇다고 g_{\max} 값을 크게 한다면 그림 2(b)와 (c)의 비교에서와 같이 양과 음으로의 채터링 폭이 커지는 단점이 있다. 결국 본 논문에서 제안 방식은 시스템의 상태에 의존적인 제어이득을 가진 시스템이나 그 상한을 결정하기



(a) 상태 출력



(b) 연속화 제어입력, (22)

그림 4. 연속화 제어법칙에 대한 결과.

Fig. 4. Results of continuous control.

어려운 시스템에 대하여 기존의 방식에 비하여 우수한 특성을 가지고 있다.

그림 4는 제안된 제어방식 (14)에 대하여 경계층을 두어 제어입력을 연속화 한 결과이다. 이 때 모든 시뮬레이션 조건은 그림 1에서의 것과 동일하며 제어입력은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 u &= g_{\min}^{-1}(\zeta - |\zeta| \text{sat}(s/\Phi)) \\
 \zeta &= -\ddot{y} + \ddot{x}_d - \lambda \dot{e} - k \text{sat}(s/\Phi)
 \end{aligned}
 \tag{26}$$

여기서 $\Phi = 0.01$ 그림 4(a)와 그림 1의 proposed method에는 큰 차이가 없음을 확인 할 수 있다. 그림 4(b)는 연속화된 제어입력을 나타내었다.

V. 결론

본 논문에서는 입력이득에 대한 하한만을 이용한 새로운 슬라이딩 모드 제어방식을 제안하였으며 이 방식은 기존의 방식에 비하여 대체로 제어입력이 커지기 때문에 도달모드가 짧고 또한 제어입력의 특성 상 양과 음으로 변화하는 입력채터링 보다는 대체로 영 또는 같은 부호의 입력채터링을 나타내기 때문에 기존의 제어방식 보다는 제안된 방식이 실

제 시스템에의 적용에 있어 좀더 용이하다. 제안된 제어법칙이 슬라이딩 조건을 만족함을 증명하였으며 기존의 제어입력과 제안된 제어입력에 대한 특성을 비교 분석하였다. 이 방식은 시스템의 제어이득에 대한 정보 중 하한만을 필요로 하기 때문에 시스템 상태에 의존적인 시스템과 같이 그 상한을 결정하기 어려운 시스템에 적용 가능하다.

참고문헌

- [1] Y. Itkis, "Control systems of variable structure," New York: Wiley, 1976.
- [2] V. A. Utkin, "Variable structure systems with sliding mode," *IEEE Trans. Automatic Control*, vol. AC-22, no. 2, pp. 212-222, Apr. 1977.
- [3] V. A. Utkin, "Sliding modes and their applications in variable structure systems," Moscow: Mir, 1978.
- [4] J. J. Slotine and S. S. Sastry, "Tracking control of non-linear systems using sliding surfaces with application to robot manipulators," *Int. J. Jurnal of Control*, vol. 38, no. 2, pp. 465-492, 1983.
- [5] J. Y. Hung, W. Gao and J. C. Hung, "Variable structure control: A survey," *IEEE Trans. Industrial Electronics*, vol. 40, no. 1, Feb. 1993.
- [6] G. Bartolini and P. Pydynowski, "An improved, chattering free, VSC scheme for uncertain dynamical systems," *IEEE Trans. Automatic Control*, vol. 41, no. 8, pp. 1220-1226, Aug. 1996.
- [7] G. Bartolini, A. Ferrara and E. Usai, "Chattering avoidance by second-order sliding mode control," *IEEE Trans. on Automatic Control*, vol. 43, no. 2, pp. 241-246, 1998.
- [8] 김진환, 함운철, "선형/비선형 슬라이딩 패치 및 스틱 현상과 그 응용," 제어 · 자동화 · 시스템공학회 논문지, 제 6 권, 7호, pp. 523-528, 2000.
- [9] 박재삼, "자기동조 경계층 범위를 갖는 적응 슬라이딩 모드제어," 제어 · 자동화 · 시스템공학회 논문지, 제 6 권, 1 호, pp. 8-14, 2000.
- [10] J. J. Slotine and W. Li, "Applied nonlinear control," Prentice Hall, 1991.



유 병 국

1967년 11월 19일생. 1992년 전북대학교 전자공학과(공학사). 1995년 전북대학교 전자공학과(공학석사). 1999년 전북대학교 전자공학과(공학박사). 현재 한려대학교 멀티미디어정보통신공학과 전임강사. 관심분야는 가변구즈제어, 적응제어, 퍼지제어 및 로봇제어, 보조기 및 의지학 등.