PI 형 도달법칙을 가지는 가변구조 제어

A Variable Structure Controller with a PI-Type Reaching Law

전 경 한, 이 연 정, 최 봉 열
(Kyung Han Chun, Yun Jung Lee, Bong Yeol Choi)

Abstract : We propose a VSC(Variable Structure Controller) with a PI-type reaching law. In General, conventional VSCs with a reaching law including a discontinuous term have the chattering problem, and thus the system may be unstable due to the disregarded high frequency dynamics in the modeling process. To resolve this problem, the PI-type reaching law is proposed in this paper. The proposed reaching law makes it easy to determine the reaching dynamics as well as the reaching time by utilizing the 2nd-order system analysis. Furthermore, since the discontinous term is not involved in the reaching law, the chattering is considerably reduced. To show the effectiveness of the proposed scheme, the stability of the proposed system is proved by Lyapunov method and the computer simulations are performed for the Ball Balance System.

Keywords: VSC, reaching law, chattering, robustness

I. 서론

최근들어 제어 시스템에 대하여 원하는 제어 성능을 가지는 동시에 불확실성에 대해서도 견실한 제어기를 설계하고자 하는 연구가 큰 관심을 끌고 있다. 이는 일반적으로 제어기 설계에 있어서 제어 대상을 모델링하는 경우 실제 시스템에는 존재하지만 모델링 되지 않은 불확실성이나 비선형성이 있고, 모델링 된다 하더라도 측정이 불가능한 경우가 있기 때문이다. 따라서 이렇게 모델링된 시스템을 이용하여 설계된 제어기는 고려하지 않았던 불확실성에 의해 원하는 제어 성능을 가지지 못하게 되므로 불확실성을 포함하는 시스템에 대한 제어기 설계가 제어 이론에서 중요한 문제 중의 하나로 대두되고 있는 것이다. 이렇게 원하는 제어 성능을 가지면서 불확실성에도 견실한 제어기 설계 방법으로 적응 제어와 가변구조 제어 등에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있으며 그 중 가변구조 제어 방법은 모터, 항공기, 로봇 매니퓰레이터 등 많은 제어 분야에서 응용되고 있다 [1].

가변구조 제어는 스위칭 평면상에서 시스템의 구조를 임의로 변화시켜 슬라이딩 운동이라는 특이한 동특성을 얻는 제어 방식이다. 이러한 슬라이딩 모드 동안에는 시스템 매개 변수 변화와 외부 잡음 등의 불확실성에 강인한 특성을 가지며 빠른 응답 특성과 물리적인 실현이 용이하다는 장점을 가진다[2-4]. 그러나 슬라이딩 모드 동안에는 제어 입력의 빠른 스위칭이 요구되는데 실제 시스템에서는 히스테리시스 특성이 나타나 빠른 스위칭 입력을 구현하기 어렵고 또한 빠른 스위칭을 할 경우 제어 입력에 소비되는 에너지의 양도 커지게 된다. 그리고 실제 시스템으로 구현할 경우 스위칭 주파수의 유한성으로 인하여 시스템 상태가 스위칭 평면 상에 머물지 않고 항상 스위칭 평면 근처에 존재하게 되어 채터링이 발생하게 된다. 이러한 채터링 현상은 시스템의 진동을 일으킬 수 있으며 또한 모델링 과정에서 무시되었던 시스템의 고주파동특성을 여기시켜 제어 대상 시스템을 불안정하게 만들수 있다. 이와 같은 채터링 문제를 해결하기 위한 연구로 도달법칙에 대한 여러 연구가 이루어져 왔다[1,5,6].

접수일자 : 1997. 5. 8., 수정완료 : 1997. 6. 17.
전경한 : 경북대학교 대학원 전자공학과
이연정, 최봉열 : 경북대학교 전자 전기공학부

최근 도달법칙을 이용한 가변구조 제어에 대한 연구로 Gao[5] 등은 Fernandez[6] 등이 제안한 흡입 방정식을 사용하여 도달 구간에서 스위칭 함수의 동특성을 결정하는 방법을 확장하여 도달법칙을 일반화하였다. 왜냐하면 채터링은 도달 모드에서 슬라이딩 모드로 전환하는 동안에 비이상적인 도달에 의해 발생하므로 도달법칙을 이용하여 도달 구간에서의 동특성을 결정함으로써 채터링 문제를 개선할 수 있고 또한 도달법칙을 가지는 도달 모드 제어 법칙의 설계가 간단하기 때문이다. 그럼에도 불구하고 Gao 등이 제시한 도달법칙은 기존의 가변구조 제어에서 많이 사용하는 불연속항을 포함하기 때문에 채터링을 야기시키는 경우가 대부분이다.

이러한 문제를 해결하기 위하여, 본 논문에서는 PI 형 도달법칙을 가지는 가변구조 제어기를 제안한다. 제안한 도달법칙은 이전의 도달법칙과는 달리 불연속 항을 포함하지 않으므로 채터링을 개선시킬 수 있는 장점을 가진다. 또한 도달 모드에서의 동특성을 간단한 2차계 시스템의 해석 방법을 이용하여 쉽게 결정할 수 있으며 이러한 동특성과 제어기 매개 변수 설계에 따라 유한 도달 시간을 가질 수 있다. 그리고 표준 정합 조건을 만족하는 불확실성에 대해서도 견실 안정함을 증명하고 모의 실험을 통해서 제안한 제어기의 타당성을 입증한다.

II. 도달 법칙을 가지는 가변구조 제어

가변구조 제어 시스템의 동특성은 크게 임의의 초기치로부터 설정된 평면에 도달하기까지의 도달 모드와 평면에 도달한 후 평면을 따라 움직이는 슬라이딩 모드의 두 구간으로 나누어 진다. 이 중 가변구조 제어의 중요한 특징은 슬라이딩 모드에 있다. 슬라이딩 모드 동안에는 시스템의 차수가 감소하고 시스템의 상태 궤적을 스위칭 평면으로 제한시켜 시스템 매개 변수 변화나 외부 잡음에 영향을 받지 않고 빠른 응답 특성과 견실성을 가지나 시스템의 상태를 스위칭 평면으로 천이시키는 도달 구간에서는 시스템 동특성의 견실성이 보장되지 않는다. 그러므로 도달 구간에서의 견실성을 상대적으로 개선시키고 또한 채터링을 고려한 도달법칙을 갖는 가변구조 제어가 연구되어졌다. 본 장에서는 원하는 슬라이딩 모드 동특성을 발생시키기 위한 슬라이딩 모드 제어와 도달 구간에서의 동특성을 결정해 주는 기존의

도달법칙에 대해 기술하고자 한다.

우선 슬라이딩 모드에서 원하는 슬라이딩 동특성을 일으키기 위한 스위칭 평면 설계와 슬라이딩 운동을 유지하기 위한 선형 등가 제어 입력에 대한 설명을 위하여 (1)과 같은 상태 방정식으로 표현되는 단일 입력 시스템을 고려한다.

$$\dot{\boldsymbol{x}}=A\boldsymbol{x}+B(u+d) \tag{1}$$

여기서 $\boldsymbol{x}\in\mathbb{R}^n$는 상태 벡터, $A\in\mathbb{R}^{n\times n}$는 선형 공칭 시스템 행렬, $B\in\mathbb{R}^{n\times 1}$는 이득 행렬이다. $u\in\mathbb{R}$는 스칼라 제어 입력, B는 완전 차수(full rank)를 가지며 행렬쌍 (A,B)는 완전 제어 가능하고, 표준정합조건을 만족하는 불확실성 d 의 크기에 대한 상위 경계치는 (2)와 같이 알려져 있다고 가정한다.

$$|d|<d_{\max} \tag{2}$$

이제 시스템 (1)에 대하여 다음과 같은 선형 스위칭 함수를 고려하자.

$$s=C\boldsymbol{x} \tag{3}$$

여기서 $C\in\mathbb{R}^{1\times n}$는 스위칭 평면 행렬이다.

그러면 슬라이딩 모드 동안 시스템의 동특성은 슬라이딩 평면상에 머무르며 $\dot{s}=0$를 만족하도록 다음과 같은 등가 제어 입력 u_{eq}를 이용하면 슬라이딩 모드를 유지하게 된다.

$$u_{eq}=-(CB)^{-1}CA\boldsymbol{x} \tag{4}$$

슬라이딩 모드 동안 시스템의 동특성은 등가 제어 입력 (4)를 시스템 (1)에 대입한 다음을 만족한다.

$$\dot{\boldsymbol{x}}=[A-B(CB)^{-1}CA]\boldsymbol{x} \tag{5}$$

(5)는 상태 궤환의 형태를 취하고 있으므로 슬라이딩 모드 동안 시스템을 안정화하기 위해서는 고유치들이 복소 s 평면의 좌반면에 위치하도록 C를 선택한다.

가변구조 제어는 슬라이딩 모드에서 불확실성에 견실한 특성이 있으므로 도달 시간을 줄이는 제어 법칙 설계가 중요하다. 또한 기존의 가변구조 제어에서 사용하는 제어 법칙들이 도달 모드에서의 동특성을 중요시 하지 않으므로 슬라이딩 모드에서 채터링이 발생하는 문제를 야기시켰다. Gao 등은 도달 구간에서 스위칭 함수의 동특성을 미분 방정식을 형태로 정의하고 매개 변수를 선택함에 따라 도달 속도를 조정할 수 있도록 하였으며 채터링 문제도 개선하였다. Gao 등이 사용한 도달법칙들은 (6)과 (7)로 표현되며, 여기서 $k>0$, $q>0$ 이다[5].

$$\dot{s}=-q\,\mathrm{sgn}(s) \tag{6}$$

$$\dot{s}=-ks-q\,\mathrm{sgn}(s) \tag{7}$$

도달법칙 (6)은 스위칭 함수를 초기값으로부터 정속도로 스위칭 평면에 도달하게 한다. 그런데 q값이 작으면 도달 시간이 길어지고 반대로 q값이 크면 슬라이딩 모드에서 채터링 문제가 발생한다. 그러므로 이 도달법칙으로는 도달 시간과 채터링 문제를 동시에 개선하기 힘들다. 그리고 도달법칙 (7)은 도달법칙 (6)의 정 속도 항에 비례 속도 항이 첨가된 경우이다. 첨가된 비례 속도 항은 스위칭 평면과의 거리에 따라 도달 속도를 변화시키므로 빠른 도달 시간과 채터링이 감소하는 장점을 가진다.

제어 대상 시스템 (1)에 대하여 도달 구간 동안 도달법칙 (7)을 만족하기 위한 제어 입력 u_{rp}는 (8)과 같다.

$$u_{rp}=-(CB)^{-1}(CA\boldsymbol{x}+ks+q\,\mathrm{sgn}(s)) \tag{8}$$

따라서 도달 구간과 슬라이딩 모드 동안의 제어 입력을 모두 고려한 가변구조 제어 입력 u를 나타내면 (9)와 같다.

$$u=\begin{cases}-(CB)^{-1}(CA\boldsymbol{x}+ks+q\,\mathrm{sgn}(s)) &, s\neq 0\\ -(CB)^{-1}CA\boldsymbol{x} &, s=0\end{cases} \tag{9}$$

Gao의 도달법칙을 이용한 가변구조 제어기의 경우 이전의 가변구조 제어에서 고려하지 못하였던 도달 구간에서 스위칭 함수의 동특성을 결정함으로써 상대적으로 견실성을 개선하였다. 그러나 도달법칙의 설계시 포함된 불연속 항으로 인하여 채터링이 완전히 제거되지는 않는다.

Ⅲ. PI 타입 도달 법칙을 가지는 가변구조 제어

기존에 제안된 도달법칙은 채터링을 발생시키는 불연속 항을 포함하고 있는 경우가 대부분이다. 본 절에서는 불연속 항을 포함하지 않으면서 채터링 문제를 개선하고 또한 설계가 간단한 PI 형의 도달법칙 및 이를 이용한 가변구조 제어기를 제안한다.

제안하는 PI 형 도달법칙은 다음과 같다.

$$\dot{s}=-k_p s-k_i\int s\,dt \tag{10}$$

여기서 k_p, k_i는 양의 실수이다.

(10)에서 제안한 도달법칙은 비례 속도 항과 적분 항으로 구성되어 있다. 사용되는 적분기는 재초기화(resetting) 기능을 가지도록 한다. 재초기화란 적분시 사용되는 초기치를 영으로 만들어주는 기능이다. 즉, 도달 구간 내에서는 스위칭 함수 값을 적분하고 슬라이딩 모드에 도달하면 적분기를 초기화한다. 이러한 재초기화 기능으로 인하여 일반적으로 적분기를 사용하는 경우 발생하는 발산(integral wind- up) 현상을 없애며 도달 구간과 슬라이딩 모드에서의 제어 입력 구조를 변화시킴으로서 가변구조 제어를 구현할 수 있다. 또한 PI 형 도달법칙은 기존의 도달법칙에 이용된 불연속 항을 포함하지 않으므로 채터링 현상을 제거시키며 2차계 해석 기법을 이용하면 기존의 도달법칙보다 도달 구간에서의 동특성을 쉽게 예측할 수 있다.

시스템 (1)에 대하여 선형 스위칭 함수 (3)을 가지도록 하며 PI 형 도달법칙 (10)을 만족하는 제어 입력 u_{rp}는 (11)과 같다.

$$u_{rp}=-(CB)^{-1}(CA\boldsymbol{x}+k_p s+k_i\int s\,dt) \tag{11}$$

슬라이딩 모드에서 사용하는 등가 제어 입력은 동일하므로 제안한 도달법칙을 만족하는 가변구조 제어 입력 u는 (12)와 같다.

$$u=\begin{cases}-(CB)^{-1}(CA\boldsymbol{x}+k_p s+k_i\int s\,dt) &, s\neq 0\\ -(CB)^{-1}CA\boldsymbol{x} &, s=0\end{cases} \tag{12}$$

한편 일반적으로 가변구조 제어는 슬라이딩 모드 동안에는 시스템 매개 변수 변화나 외부 잡음 등에 강인한 특성을 가진다. 본 논문에서는 표준 정합 조건을 만족하는 불확실성에 대하여 견실 안정성을 가지는 가변구조 제어 입력을 제안한다.

시스템 (1)에 대하여 슬라이딩 평면을 가지도록 하며 시스템을 견실 안정화 시키는 다음과 같은 가변구조 제어 입

력 u를 제안한다.

$$u=\begin{cases} -(CB)^{-1}(CA\boldsymbol{x}+k_p s+k_i\int s\,dt) & \\ \qquad -d_{max}\,\mathrm{sgn}(CBs) & , s\neq 0 \\ -(CB)^{-1}CA\boldsymbol{x} & , s=0 \end{cases} \tag{13}$$

제안한 가변구조 제어 입력 (13)이 불확실성을 포함하는 시스템 (1)을 견실 안정화 시킴을 다음 정리에서 알 수 있다.

정리 : (2)를 만족하는 불확실성을 포함하는 시스템 (1)에 대하여 제어 입력 (13)은 스위칭 함수 (3)의 전대역 점근 안정성을 만족시킨다.

증명 : 다음과 같은 Lyapunov 후보 함수를 정의한다.

$$V=\frac{1}{2}s^2 \tag{14}$$

이때 (14)를 시간에 대하여 미분하고 $\dot{s}$을 구해 대입하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{V} &= s\dot{s} \\ &= s(CA\boldsymbol{x}+CBu+CBd) \end{aligned} \tag{15}$$

여기에 제안한 가변구조 제어 입력을 대입하면

$$\begin{aligned} \dot{V} &= s(-k_p s-k_i\int^t sdt-CBd_{max}\mathrm{sgn}(CBs)+CBd) \\ &= -k_p s^2-k_i s\int sdt-CBs(d_{max}\mathrm{sgn}(CBs)-d) \end{aligned} \tag{16}$$

과 같다. 그리고 슬라이딩 모드에서 적분기의 재초기화 기능과 불확실성의 조건 (2)를 이용하면 다음을 만족한다.

$$\dot{V}<0 \tag{17}$$

그러므로 스위칭 함수는 원점에 대해 전대역 점근 안정성을 만족함을 알 수 있다. ■

제안한 가변구조 제어 입력 (13)은 표준 정합 조건을 만족하는 불확실성을 포함하는 시스템 (1)을 견실 안정화 시킴을 증명하였다. 그러나 도달법칙만을 고려하여 제안한 제어 입력 (12)의 경우와 비교해보면 불연속 항이 포함됨을 알 수 있다. 이는 견실성을 얻기 위하여 첨가된 제어 입력에 의한 것이다. 불연속 항이 포함되면 기존의 도달법칙을 이용하는 경우와 동일하게 채터링이 발생하게 된다. 그러나 모의 실험에서 알 수 있듯이 불확실성에 대한 성능 검증을 위하여 동일한 제어 입력을 첨가하였을 경우 제안한 제어 법칙이 채터링 측면에서 개선됨을 알 수 있다.

Ⅳ. 모의 실험

제안한 제어 법칙의 타당성을 점검하고 기존의 제어 법칙과 비교하기 위하여 볼 밸런스 시스템에 적용하였다. 볼 밸런스 시스템은 그림 1과 같으며 막대 위에 실패 모양의 동체가 움직인다. 막대에 연결된 줄로서 막대를 움직여 실패 모양의 동체를 원하는 위치에 가도록 제어하는 시스템이다. 이를 선형 근사화 모델링 하면 4개의 상태를 가지는 4차 시스템으로 표현할 수 있으며 이를 이용하여 제안한 제어 법칙과 기존의 제어 법칙의 장단점을 살펴 본다.

$$\dot{\boldsymbol{x}}=\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{2}{3}g & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & -10 \end{bmatrix}\boldsymbol{x}+\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 4.4 \end{bmatrix}u \tag{18}$$

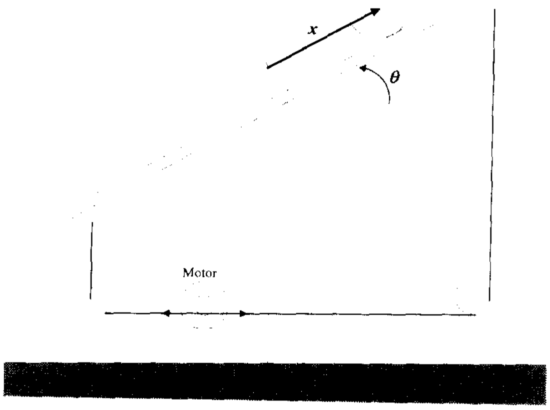

그림 1. 볼 밸런스 시스템(정면도).
Fig. 1. Ball balance system(front view).

여기서 g는 중력가속도로 $9.8\,m/s^2$ 을 나타내고 $\boldsymbol{x}$는 다음과 같다.

$$\boldsymbol{x}=\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ \theta \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} \tag{19}$$

각각 x는 릴의 위치, $\dot{x}$는 릴의 속도, θ는 바의 각, $\dot{\theta}$는 바의 각속도를 나타낸다. 이제 제어 법칙의 특성을 살펴보기 위하여 필요한 매개변수를 구하여야 한다. 우선 슬라이딩 모드에서 원하는 동특성을 가지도록 하는 슬라이딩 평면을 설계한다. 슬라이딩 모드에서 원하는 고유치 $(-1.5, -2+1.7j, -2-1.7j)$를 가지는 슬라이딩 평면은 상태궤환에 의하여 구할 수 있으며 그 값은 다음과 같다.

$$C=[1.5827\ \ 1.9740\ \ 5.5000\ \ 1.0000] \tag{20}$$

이제 도달 모드에서 도달 특성을 결정짓는 도달법칙의 매개변수를 결정하여야 한다. 도달 모드에서의 특성은 도달 기간이 두드러진 사양이 될텐데 이는 매개변수의 값에 의존하므로 동일한 조건하에서 성능 비교를 위하여 제안한 도달법칙과 Gao의 도달법칙이 동일한 도달 기간을 가지도록 선택한다. 한 가지 지적할 점은 Gao의 도달법칙의 경우 도달 기간이 스위칭 함수의 초기 값에 의존하는 데 반해 제안한 도달법칙의 경우 도달법칙의 매개 변수에 따라 도달 기간이 결정되므로 초기값에 상관없이 도달 기간을 예측할 수 있다. 사용한 도달법칙의 매개 변수는 다음과 같다.

$$k=2,\ q=1,\ k_p=2,\ k_i=75.88 \tag{21}$$

공칭 시스템에 대한 모의 실험에서 제안한 제어법칙은 기존의 도달법칙에서 나타나던 채터링이 완전히 제거 되었음을 알 수 있다(그림 2, 그림 3). 이는 도달법칙에 불연속적인 항을 이용하지 않았으므로 나타나는 효과이다. 또한 도달 기간을 원하는 사양에 맞추어 도달법칙의 매개 변수를 정할 수 있으며 이는 2차계 시스템의 해석의 이용으로 쉽게 결정할 수 있다.

지금까지 모델링이 완벽하게 되었다고 생각하고 공칭 시스템에 대하여 제어 법칙을 설계하고 모의 실험하였다. 그러나 실제 실험에서는 모델링시 고려하지 못하였던 비선형성이나 외란등 불확실성이 포함되므로 제어 입력 설계시 이를 고려하여야 한다. 비교를 위하여 불확실성을 동일하게 두고 본문에서 제안한 보상 제어 입력을 사용하였으며 고려한 불확실성은 다음과 같다.

$$d=0.1\sin(1000t) \tag{22}$$

제안한 제어 법칙은 모델링이 정확히 되지 않은(불확실성을

포함하는) 시스템에 대해 제어 법칙을 설계하였음에도 불구하고 채터링의 증가없이 빠른 속도로 영으로 수렴함을 알 수 있다(그림 4, 그림 5). 이는 기존의 제어 법칙에서 도달법칙에 불연속항을 사용함으로써 나타나는 영향을 PI 형 도달법칙을 이용하여 개선하여 나타난 효과이다.

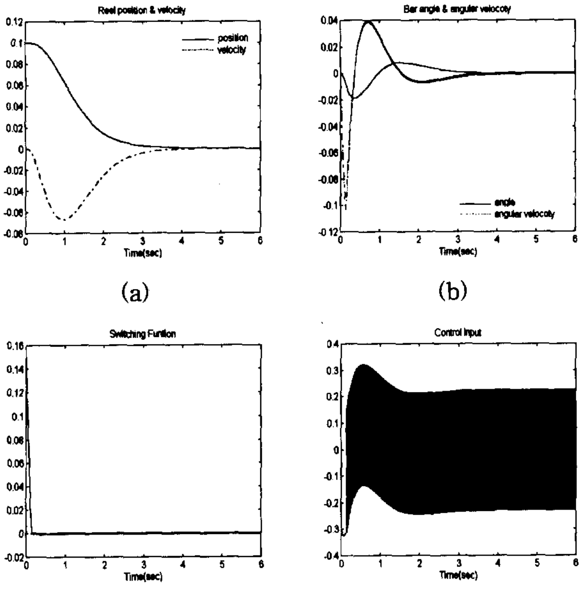

그림 2. Gao의 도달법칙($d=0$).
(a) 릴의 위치와 속도, (b) 막대각의 각과 각속도, (c) 스위칭 함수, (d) 제어 입력.

Fig. 2. Gao's reaching law($d=0$).
(a) Reel's position and velocity, (b) Bar's angle and angular velocity, (c) Switching function, (d) Control input.

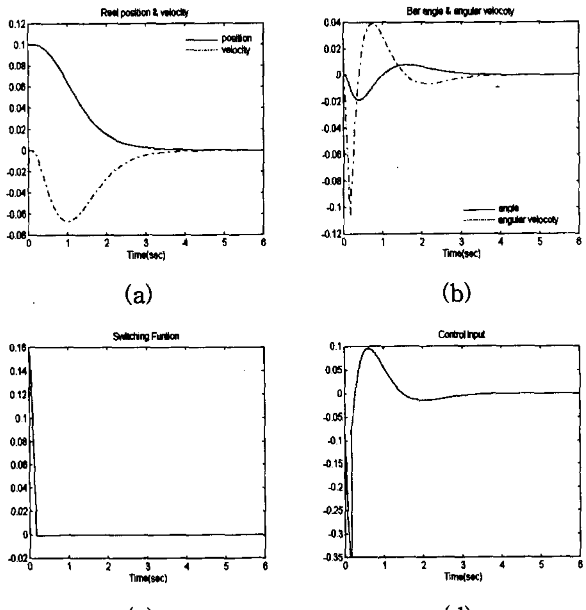

그림 3. 제안한 도달법칙($d=0$).
(a) 릴의 위치와 속도, (b) 막대각의 각과 각속도, (c) 스위칭 함수, (d) 제어 입력.

Fig. 3. Proposed reaching law($d=0$).
(a) Reel's position and velocity, (b) Bar's angle and angular velocity, (c) Switching function, (d) Control input.

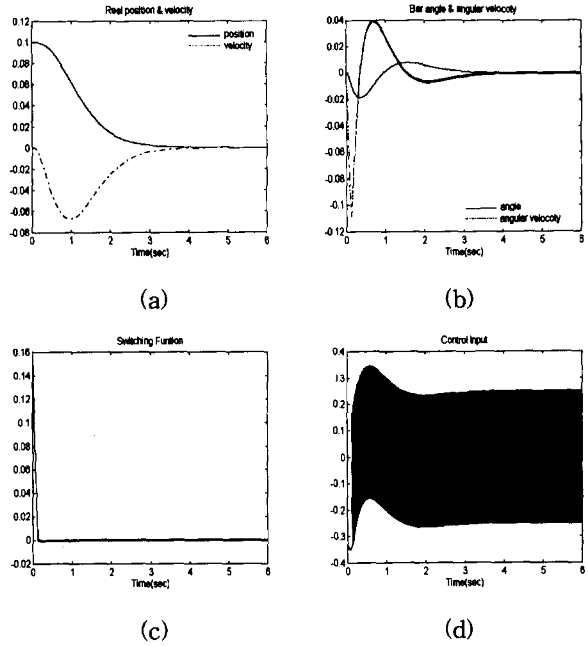

그림 4. Gao의 도달법칙($d=0.1\sin(1000t)$).
(a) 릴의 위치와 속도, (b) 막대각의 각과 각속도, (c) 스위칭 함수, (d) 제어 입력.

Fig. 4. Gao's reaching law($d=0.1\sin(1000t)$).
(a) Reel's position and velocity, (b) Bar's angle and angular velocity, (c) Switching function, (d) Control input.

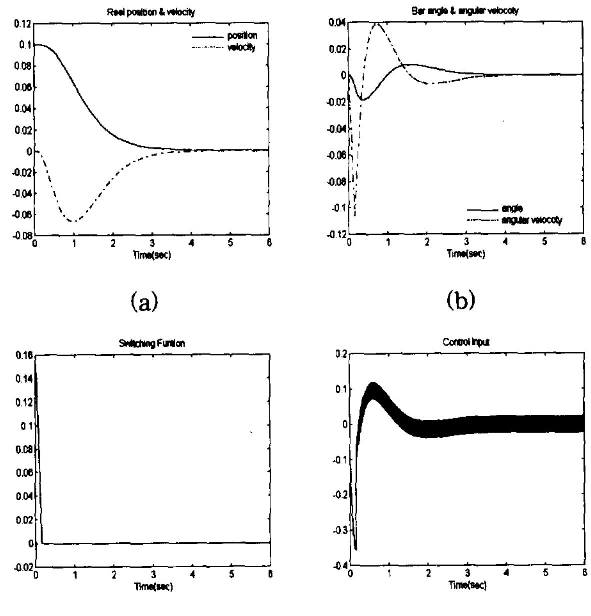

그림 5. 제안한 도달법칙($d=0.1\sin(1000t)$).
(a) 릴의 위치와 속도, (b) 막대각의 각과 각속도, (c) 스위칭 함수, (d) 제어 입력.

Fig. 5. Proposed reaching law($d=0.1\sin(1000t)$).
(a) Reel's position and velocity, (b) Bar's angle and angular velocity, (c) Switching function, (d) Control input.

V. 결론

본 논문에서는 PI 형 도달법칙을 가지는 가변구조 제어기를 제안하였다. 이러한 PI 형 도달법칙을 이용한 가변구조 제어는 기존의 도달법칙과는 달리 불연속항을 포함하지 않

으므로 채터링 문제를 크게 개선시키며 도달 시간이 초기치에 의존하는 기존의 방법과는 달리 제안된 방법은 이차계 시스템 해석을 이용하여 도달법칙의 매개변수를 결정함으로써 원하는 도달 시간을 얻을 수 있다. 또한 정확하지 못한 모델로 인해 발생하는 불확실성에 대해서도 슬라이딩 모드에서 원하는 동특성을 가짐을 보였으며 Lyapunov 안정 조건을 만족함을 증명하였다. 제안한 제어 법칙의 타당성을 보이기 위하여 제어 분야에 일반적으로 많이 사용하는 불밸런스 시스템에 적용하였으며 기존의 도달법칙보다 채터링 문제에서 탁월한 성능을 보임을 확인하였다.

참고문헌

[1] J. Y. Hung, W. B. Gao, and J. C. Hung, "Variable structure control: A survey," *IEEE Trans. Ind Electron*, vol. 40, no. 1, pp. 2-22, Feb., 1993.

[2] V. I. Utkin, "Variable structure system with sliding modes," *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. 22, no. 2, pp. 212-222, 1977.

[3] O. M. E. El-Ghezawi, A. S. I. Zinober, and S. A. Billings, "Analysis and design of variable structure systems using a geometric approach," *Int. J. Contr.*, vol. 38, no. 3, pp. 657-671, 1983.

[4] R. A. Decarlo, S. H. Zak, and G. P. Matthews, "Variable structure control of nonlinear multivariable systems: A tutorial," *Proc. IEEE*, vol. 76, no. 3, pp. 212-232, 1988.

[5] W. B. Gao and J. C. Hung, "Variable structure control of nonlinear systems: A new approach," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 40, no. 1, pp. 45-55, Feb., 1993.

[6] R. B. Fernandez and J. K. Hedrick, "Control of multivariable nonlinear systems by the sliding mode method," *Int. J. Contr.*, vol. 46, no. 3, pp. 1019-1040, 1987.

[7] F. H. Raven, *Automatic Control Engineering*, Mc-Graw Hill, 1995.

전 경 한

1968년 1월 22일생. 1991년 2월 경북대학교 전자공학과 졸업. 1993년 2월 경북대학교 대학원 전자공학과 졸업(석사). 1993년 ~ 현재 동 대학원 박사과정. 주관심분야는 가변구조제어, 적응제어, 퍼지제어, 유전 알고리즘.

이 연 정

제어·자동화·시스템공학 논문지 제 2권 제 4호 286쪽 참조.

최 봉 열

제어·자동화·시스템공학 논문지 제 1권 제 2호 82쪽 참조.