비선형 계통에 대한 슬라이딩 모드 제어기의 설계

論 文
54D-2-2

Design of Sliding Mode Controller for Nonlinear System

金 玟 贊[†] · 李 在 東[*] · 朴 勝 奎[**] · 郭 君 平[***] · 安 鎬 均[§]
(Min-Chan Kim · Jae-Dong Lee · Seung-Kyu Park · Gun-Pyong Kwak · Ho-Kyun Ahn)

Abstract - In this paper, the feedback linearization technique is used with the sliding mode control for nonlinear systems. This combination of the two control techniques is achieved by introducing a novel sliding surface which has the nominal dynamics of the original system controlled by feedback linearization technique. Its design is based on the augmented system whose dynamics have a higher order than that of the original system. The reaching phase is removed by using an initial virtual state which makes the initial sliding function equal to zero.

Key Words : 비선형 계통, 슬라이딩 모드 제어, 궤환 선형화, 강인 제어, 파라미터 불확실성

1. 서 론

궤환 선형화(Feedback Linearization) 제어 기법은 비선형 계통에 대해 대수적인 변환 즉, 비선형 좌표 변환과 비선형 피드백을 이용하여 비선형 계통의 비선형성을 제거하여 정확한 선형화를 가능케 함으로써 이미 많은 연구가 되어 있는 선형 제어 이론을 그대로 도입하여 사용할 수 있다는 커다란 장점을 가지고 있다. 그러나 대부분의 계통은 사실상 정확한 모델링이 불가능한 불확실성이 존재하는 비선형 계통이기 때문에 비선형 계통의 정확한 동특성을 알아야만 적용 가능한 궤환 선형화 기법을 실제 응용에 적용하는 데에는 많은 제약이 따른다.[1][2][3]

슬라이딩 모드제어(Sliding Mode Control) 이론은 우선 알고리즘이 간단하며, 안정도를 보장받을 수 있을 뿐만 아니라 제어기의 물리적 실현이 용이하기 때문에, 실시간 제어에 유리하다는 장점을 가지고 있다.[4][5][6] 특히 계통의 파라미터 변화나 외란에 관한 정보를 모른다 해도 파라미터와 외란에 대한 변화의 한계치만 알고 있으면 계통을 제어 할 수 있으므로 미지의 파라미터를 추정할 필요가 없다. 또한 슬라이딩 모드 제어 이론은 종래의 제어 계통과 달리 불연속값 제어 입력에 의해 과도기간 중 제어계통의 구조를 의도적으로 스위칭 논리에 의해 바꿔줌으로써 응답의 정확성과 속응성을 동시에 개선 할 수 있다. 그리고 계통을 슬라이딩 모드라는 동특성에 머무르도록 제어 입력을 스위칭 해 줌으로써 계통이 파라미터 변화나 외란에 둔감해 짐으로써 계통의 견실성이 향상된다.

하지만 근본적으로 상태 궤적이 초기 위치에서 스위칭 평면까지 도달하는데 걸리는 시간 즉, 도달기간(Reaching Phase)에는 슬라이딩 모드가 발생하지 않는 상태에 있으므로 계통의 응답은 파라미터의 변화나 외란에 민감하다.[7][8] 또한 상태 궤적이 슬라이딩 평면을 따라 진행하는 슬라이딩 모드를 얻기 위해서 스위칭 논리에 따라 제어 입력의 구조를 바꿔 주기 때문에 입력 떨림(Input Chattering)이 존재한다.[9-14] 이러한 문제들 외에 슬라이딩 모드 제어는 슬라이딩 평면이 제어대상의 계통보다 입력의 수만큼 낮은 차수를 가지는 동특성을 가지기 때문에 다른 제어기법과 같이 결합하여 사용하기가 매우 어렵다는 특성을 가지고 있다.

본 논문에서는 궤환 선형화 제어기법에 슬라이딩 모드제어를 사용하여 강인성을 추가하는 방법을 제안한다. 궤환 선형화 기법과 슬라이딩 모드제어를 결합한 기존의 논문들[15-20]이 있으나 앞에서 설명한 슬라이딩 모드제어의 한계성을 가지고 있기 때문에 선형제어 이론을 적용시킬 수 있다는 장점을 살리기가 어렵다. 그러므로 일반 선형제어이론과 결합될 수 있는 슬라이딩 모드 제어기법을 도입하였다. 이것은 다른 제어기법과 같이 결합하여 사용하기 어려운 특성을 개선하기 위해서 가상의 상태를 정의함으로써 가능해진다.[21] 이 가상 상태는 일반적인 제어기법에 의해 제어되는 공칭 계통의 가제어 표준형을 기초로 구성된다. 얻어진 가상 상태를 비공칭 계통에 포함시켜 가상 상태의 동특성이 추가되어 차수가 증가된 계통을 구성하고 확장된 계통에 대한 슬라이딩 평면을 설계한다. 설계된 슬라이딩 평면은 공칭 제어기에 의해서 제어되는 공칭 계통과 같은 동특성을 가짐을 증명 할 수 있다. 그러므로 슬라이딩 평면에 포함되어 있는 공칭 제어 입력에 의해서 다양한 형태의 제어기가 설계 가능하고 슬라이딩 모드 제어기가 결합된 제어기를 구

† 교신저자, 正會員 : 昌原大 電氣工學科 工博
Email : kmc710@kebi.com
* 正 會 員 : 넥스원퓨처(주) 航空電子 시스템 엔지니어
** 正 會 員 : 昌原大 電氣工學科 敎授 · 工博
*** 正 會 員 : 昌原大 電氣工學科 副敎授 · 工博
§ 正 會 員 : 昌原大 電氣工學科 敎授 · 工博
接受日字 : 2004年 10月 1日
最終完了 : 2004年 12月 21日

성할 수 있다. 즉, 새롭게 구성된 슬라이딩 평면이 궤환 선형화 이론에 의해 제어된 계통의 동특성을 가질 수 있다. 또한 가상의 상태를 도입하는 과정에서 가상 상태의 초기값을 슬라이딩 평면의 초기값이 영이 되도록 함으로써 도달기간을 제거할 수 있다. 그러므로 불확실성이 존재하는 비선형 단일 입력 계통에 대해서 궤환 선형화 기법을 이용한 공칭 제어기와 슬라이딩 모드 제어기를 결합하여 불확실성에 강인한 형태의 제어기를 설계할 수 있다. 이러한 이론적인 고찰들과 함께 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 본 논문의 타당성을 입증한다.

2. 불확성이 존재하는 비선형 계통의 궤환 선형화

다음과 같은 불확실성을 가지는 n차 비선형 계통을 고려하자.

$$\dot{x}(t)=f(x)+\Delta f(x)+[g(x)+\Delta g(x)]u(t)+d(t) \tag{1}$$

여기서, $x(t)\in R^n$계통의 상태 벡터, $u(t)\in R$은 제어 입력, $d(t)\in R^r$은 계통에 인가되는 외란 벡터이며 $\Delta f(x), \Delta g(x), d(t)$는 아래와 같은 정합조건(matching condition)을 만족시킨다.

$$\Delta f(x)=g(x)\tilde{f}(x)$$

$$\Delta g(x)=g(x)\tilde{g}(x)$$

$$d(t)=g(x)\tilde{d}(t)$$

그러므로 식(1)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{x}(t)=f(x)+g(x)u(t)+g(x)h(t) \tag{2}$$

여기서, $h(t)=\tilde{f}(x)+\tilde{g}(x)+\tilde{d}(t)$ 이다.
또한 f와 g는 R^n내에 있는 개집합(open set) U 위의 연속 미분 가능한 원활한 벡터장(C^∞vector field)이고 $f(0)=0$, $x\in R^n$, $u\in R$이라고 가정한다. 비선형 좌표변환 $z(t)=\Phi x(t)$ ($\Phi : R^n\rightarrow R^n$)와 비선형 궤환 $u(t)=\alpha(x)+\beta(x)v(t)$ ($\alpha,\beta : R^n\rightarrow R$)를 통하여 비선형 계통을 새로운 좌표계에서 다음과 같은 선형 계통으로 변환된다.

$$\dot{z}(t)=Az(t)+Bv(t)+Bh(t) \tag{3}$$

여기서, $A=\begin{bmatrix}0&1&0&\cdots&0\\0&0&1&\cdots&0\\\vdots&\vdots&\vdots&\ddots&1\\0&0&0&\cdots&0\end{bmatrix}$, $B=\begin{bmatrix}0\\0\\\vdots\\1\end{bmatrix}$, (A, B)는 Brunovsky 표준형 쌍이고, $v(t)$는 새로운 좌표계에서의 제어입력이다.

궤환 선형화 기법을 블록 다이어그램으로 나타내면 아래와 같이 두 개의 루프로 구성된다. 내부 루프는 선형화 루프이며, 외부 루프는 전체 폐루프 동특성을 안정화시키는 루프이다. 제어 입력 u는 비선형성을 제거하는 부분과 선형 보상 부분으로 이루어져 있다.

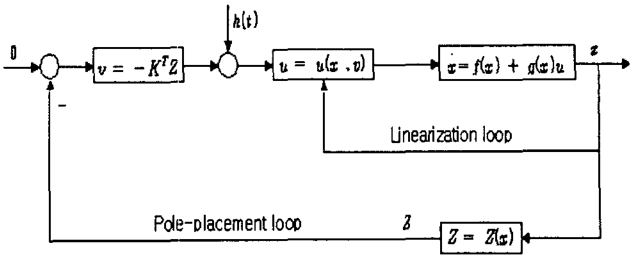

그림 1 궤환 선형화 블록선도
Fig. 1 Block diagram of input-state linearization

식(2)과 같은 비선형 시스템에 궤환 선형화를 적용하기 위해서는 아래의 조건을 만족하는 영역 Ω가 존재하여야 한다.

1. $\{g,\ ad_f g,\ \cdots,\ ad_f^{n-1} g\}$는 Ω의 영역에서 선형 독립이다.
2. $\{g,\ ad_f g,\ \cdots,\ ad_f^{n-2} g\}$는 Ω의 영역에서 대합적(involutive)이다.

여기서, $ad_f g=\nabla g\cdot f-\nabla f\cdot g$ 이다.

불확실성이 존재하는 비선형 계통에 대해서 궤환 선형화 기법을 적용시키는 경우 불확실성이 존재하지 않는 부분에 대해서만 선형화가 가능하며 불확실성에 대한 강인성은 다른 강인성을 가진 제어기법을 사용하여야 한다. 본 논문에서는 슬라이딩 모드제어기를 사용하여 강인성을 부여하기로 한다.

3. 슬라이딩 모드제어기의 설계

선형 계통에서 전형적인 슬라이딩 모드제어는 상태 공간상에서 어떤 특정한 슬라이딩 평면을 정하고 이에 대한 상태벡터의 위치에 따라 상태벡터를 슬라이딩 평면으로 향하도록 하는 불연속적인 입력을 가해줌으로써 상태벡터가 빠른 속도로 슬라이딩 평면을 따라 원점으로 수렴하게 하는 슬라이딩 모드를 발생시키는 제어이론이다.

전형적인 슬라이딩 평면은 다음과 같은 형태로 표현한다.

$$S(x)=\{x\in R^n \mid c_n x_n+c_{n-1}x_{n-1}+\cdots+c_2x_2+c_1x_1+c_o=0\} \tag{4}$$

여기서, $[c_n, c_{n-1}, \cdots, c_2, c_1, c_o]$은 슬라이딩 평면의 동특성이 안정하도록 선정한다.
슬라이딩 모드제어에서는 상태공간이 슬라이딩 평면 쪽으로 이동해서 슬라이딩 모드가 일어나게 하는 조건을 도달 조건(reaching condition)이라고 하는데 다음과 같은 Lyapunov 함수의 후보함수를

$$V(S)=\frac{1}{2}S(x)^2$$

고려하면 다음과 같은 슬라이딩 모드를 보장하는 도달 조건을 구할 수가 있다.

$$\frac{dV(s)}{dt}<0 \quad , \quad V\neq 0 \quad \Rightarrow \quad S(x)\dot{S}(x)<0 \tag{5}$$

위의 조건은 $S(x)$에 정의되는 평면상에서 불연속이 일어나

는 다음과 같은 궤환 입력에 의해 만족될 수 있다.

$$u(\cdot)=\begin{cases} u^{+}(\cdot), & \text{for } S(x)>0 \\ u^{-}(\cdot), & \text{for } S(x)<0 \end{cases} \quad (6)$$

하지만 전형적인 슬라이딩 모드제어에서는 시스템의 동특성은 식(4)와 같은 슬라이딩 평면의 동특성에 의존하게 된다. 이것은 궤환 선형화와 결합될 때 다양한 선형 제어이론을 적용시킬 수 있다는 장점을 잃어버리게 한다.

본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위하여 선형제어이론과 결합될 수 있는 슬라이딩 모드제어기를 구성하고 궤환 선형화와 결합시키며 그 과정은 다음과 같다.

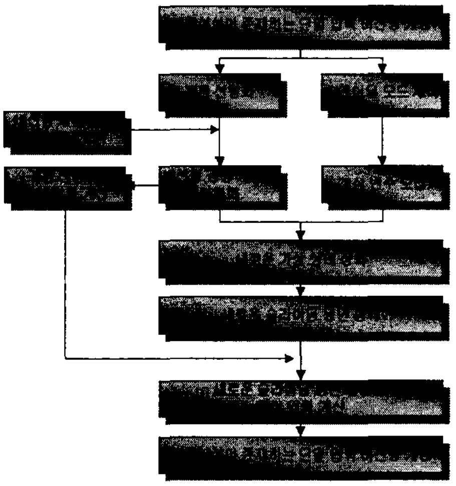

그림 2 가상 상태와 슬라이딩 모드 제어입력을 구하는 과정

Fig. 2 The procedure of obtaining the virtual state and sliding mode control input

새롭게 구성되는 슬라이딩 평면은 가상 상태를 포함하며, 가상 상태는 다음의 공칭 계통으로부터 정의된다.

$$\begin{bmatrix} \dot z_{o1}(t) \\ \dot z_{o2}(t) \\ \vdots \\ \dot z_{o(n-1)}(t) \\ \dot z_{on}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & 1 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} z_{o1}(t) \\ z_{o2}(t) \\ \vdots \\ z_{o(n-1)}(t) \\ z_{on}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} \cdot v_o(t) \quad (7)$$

여기서, 공칭입력은 Brunovsky 표준형이 원점에 n개의 고유값을 가지는 불안정한 계통이므로 전체 계통을 안정화 시키기 위해서 다음과 같은 상태 궤환 입력을 인가한다.

$$v_0(t)=-Kz_0(t) \quad (8)$$

여기서, $K=[k_1\ k_2\ \cdots\ k_n]$는 상태 궤환 이득이다.

가상 상태는 다음과 같이 정의된다.

$$\dot z_v(t)=-k_1z_2(t)-k_2z_3(t)-\cdots\cdots-k_nz_v(t) \quad (9)$$

가상의 상태가 추가된 차수가 증가된 계통은 다음과 같다.

$$\dot x(t)=f(x)+g(x)u(t)+g(x)h(t)$$
$$\dot z_v(t)=-k_1z_2(t)-k_2z_3(t)-\cdots\cdots-k_nz_v(t) \quad (10)$$

위의 계통에 대하여 슬라이딩 평면을 다음과 같이 구성한다.

$$S(z,z_v)=z_v(t)+Kz(t)=z_v(t)+k_1z_1(t)+k_2z_2(t)+\cdots\cdots+k_nz_n(t) \quad (11)$$

[보조정리]
계통의 상태가 제안된 슬라이딩 평면 위에 존재할 때 계통의 상태는 공칭 제어 입력에 의해서 제어되는 공칭 계통과 같은 동특성을 갖는다.[21]

[정리]
다음의 제어입력을 인가하면 제어계통의 동특성은 식(7)과 같은 공칭계통의 동특성을 갖는다.

$$v(t)=(KB)^{-1}(k_nz_{v(t)}-KBh(t)_{\max}\cdot sgn(s)) \quad (12)$$

(증명)
슬라이딩 모드를 보장하는 도달 조건을 고려하기 위한 Lyapunov 후보함수는 다음과 같다.

$$V(S)=\frac{1}{2}S(x)^2$$

$$\begin{aligned}\frac{dv(s)}{dt} &= S\dot S = S(\dot z_v(t)+Kz(t)) \\ &= S(\dot z_v(t)+K(Az(t)+Bv(t)+Bh(t))) \\ &= S(-k_nz_v(t)+KBv(t)+KBh(t))\end{aligned} \quad (13)$$

위의 식에서 식(12)의 입력을 인가하면 $S\dot S<0$를 만족하므로 계통의 상태들이 슬라이딩평면에 존재하게 되며 보조정리에 의해서 계통의 상태들이 식(7)과 같은 공칭계통의 동특성을 갖게 된다.
(증명끝)

정리와 슬라이딩 모드 제어이론으로부터 슬라이딩 모드 제어입력 $v(t)$ 가 슬라이딩 모드 평면 $S(z,z_v)$ 상에 상태들이 있도록 하면 상태 $x(t)$는 $v_o(x,t)$에 의해서 제어되는 공칭 시스템의 궤적을 따른다는 것을 알 수 있다. 공칭 제어 입력 $v_o(x,t)$는 어떠한 제어입력의 형태라도 가능하기 때문에 슬라이딩 모드 제어가 다양한 형태의 제어기와 같이 사용되어 질 수 있다는 것을 의미한다.

가상 상태의 초기치를 다음과 같이 선택하면 슬라이딩 함수의 초기값이 영이 되어 도달기간을 제거할 수 있다.

$$z_v(t_o)=-k_1z_1(t_o)-k_2z_2(t_o)-\cdots\cdots-k_nz_n(t_o) \quad (14)$$

4. 수치 예제 및 시뮬레이션

본 논문에서 제시한 제어 기법을 적용하기 위해서 다음과 같은 불확실성이 포함된 유연 관절을 가진 단일링크 머니퓰레이트를 고려한다.

저 자 소 개

김 종 해 (金 鍾 海)
1993년 경북대학교 전자공학과 졸업. 1998년 동 대학원 전자공학과 졸업(공박). 1998년~2002년 경북대학교 센서기술연구소 전임연구원. 2000년~2001년 일본 오사카대학 객원연구원. 2002년~현재 선문대학교 전자정보통신공학부 조교수.
Tel : 041-530-2352
E-mail : kjhae@sunmoon.ac.kr

안 성 준 (安 性 俊)
1987년 서울대학교 물리학과 졸업. 1992년 한국과학기술원 물리학과 졸업(이박). 1992년~1995년 삼성전자 반도체연구소 선임연구원. 1995년~1996년 한국과학기술원 자연과학대학 연구원. 1996년~2002년 한전 전력연구원 선임연구원. 2002년~현재 선문대학교 전자정보통신공학부 조교수.
Tel : 041-530-2350
E-mail : sjahn0@sunmoon.ac.kr

안 승 준 (安 承 濬)
1985년 경북대학교 물리학과 졸업. 1993년 한국과학기술원 물리학과 졸업(이박). 1993년~1997년 삼성전자 반도체연구소 선임연구원. 1997년~현재 선문대학교 신소재과학과 부교수.
Tel : 041-530-2261
E-mail : sjan@sunmoon.ac.kr

오 도 창(吳 道 昌)
1991년 경북대학교 전자공학과 졸업. 1997년 동 대학원 전자공학과 졸업(공박). 1997년~현재 건양대학교 전자정보공학과 조교수.
Tel : 041-730-5369
E-mail : docoh@kytis.konyang.ac.kr

지 경 구 (池 京 求)
1987년 서울대학교 물리학과 졸업. 1993년 한국과학기술원 물리학과 졸업(이박). 1993년~현재 삼성전자 반도체연구소 수석연구원.
Tel : 031-209-9532
E-mail : kk.chi@samsung.com

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u + g(x)h$$
$$\dot{z}_v = -k_1 z_2 - k_2 z_3 - k_3 z_4 - k_4 z_v \tag{25}$$

위의 계통에 대하여 슬라이딩 평면을 다음과 같이 구성한다.

$$S(z, z_v) = z_v + k_1 z_1 + k_2 z_2 + k_3 z_3 + k_4 z_4 \tag{26}$$

슬라이딩 평면을 미분하면 다음 계산식을 만족한다.

$$S(z, z_v) = -k_4 z_v + k_4[\frac{k}{I} B_2(z_2 + \frac{I}{k}(z_4 + \frac{MgL}{I} z_2 \cos z_1))] + k_4 v \tag{27}$$

그러므로 슬라이딩 모드 제어입력은 다음과 같다.

$$v = \frac{1}{k_4}[k_4 z_v - k_4[\frac{k}{I} B_{2_{max}}(z_2 + \frac{I}{k}(z_4 + \frac{MgL}{I} z_2 \cos z_1)) \cdot sgn(S)] \tag{28}$$

다음의 그림들은 수치 예제에 대한 시뮬레이션 결과이다. 그림 4는 파라미터 불확실성이 존재하지 않는 공칭 계통에 대하여 궤환 선형화 기법을 적용하였을 때의 상태 궤적을 나타내고 있으며, 그림 5는 파라미터 불확실성이 존재하는 계통(B_2 = 0.1)에 대한 궤환 선형화 입력에 의한 상태 궤적이며 상태들이 불확실성의 영향을 받아 공칭 계통의 상태 궤적 동특성을 가지지 못함을 알 수 있다. 그리고 그림 6은 불확실성이 존재할 때의 궤환 선형화 입력이다. 반면 그림 7은 파라미터 불확실성이 존재하는 비선형 계통에 대하여 제안된 슬라이딩 모드 제어 기법을 이용하였을 때의 상태 궤적을 나타내는데 그림 4와 같은 공칭 계통의 상태 궤적과 같은 동특성을 나타냄을 볼 수 있다. 이것은 제안된 슬라이딩 모드 제어기가 파라미터 불확실성에 강인하다는 것을 입증한다. 또한 그림 8은 슬라이딩 모드 제어입력이며 그림 9는 슬라이딩 평면의 궤적을 나타낸 것으로 도달기간이 제거되었음을 보여주고 있다.

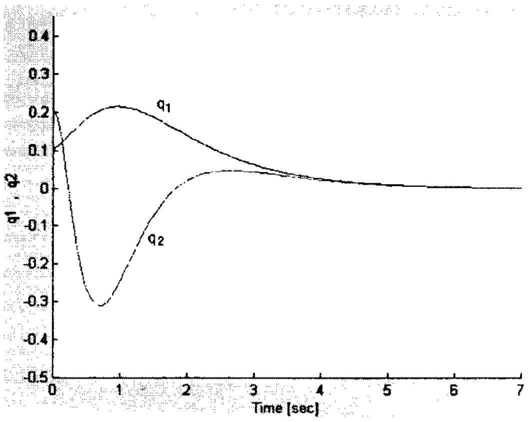

그림 4 궤환 선형화 입력에 의한 상태 궤적 (불확실성이 존재하지 않는 경우)

Fig. 4 The state trajectories by feedback linearization input (without parameter uncertainty)

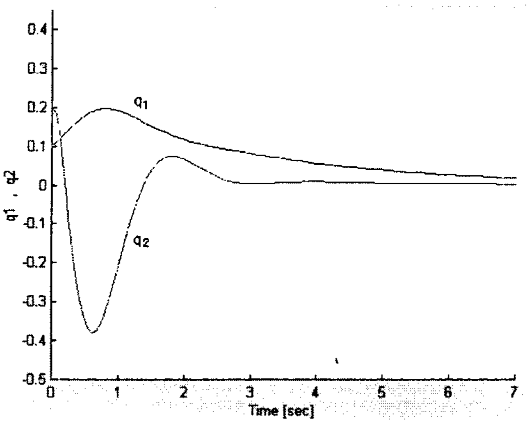

그림 5 궤환선형화 입력에 의한 상태 궤적 (불확실성이 존재하는 경우)

Fig. 5 The state trajectories by fedback linearization input (with parameter uncertainty)

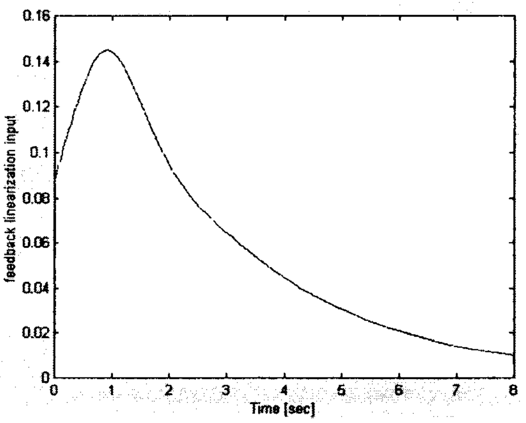

그림 6 궤환 선형화 입력 (불확실성이 존재하는 경우)

Fig. 6 Feedback linearization input (with parameter uncertainty)

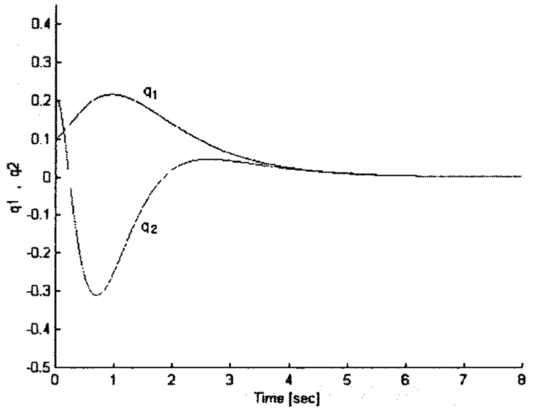

그림 7 제안된 슬라이딩 모드 제어에 의한 상태 궤적(불확실성이 존재하는 경우)

Fig. 7 The state trajectories by proposed sliding mode control (with parameter uncertainty)

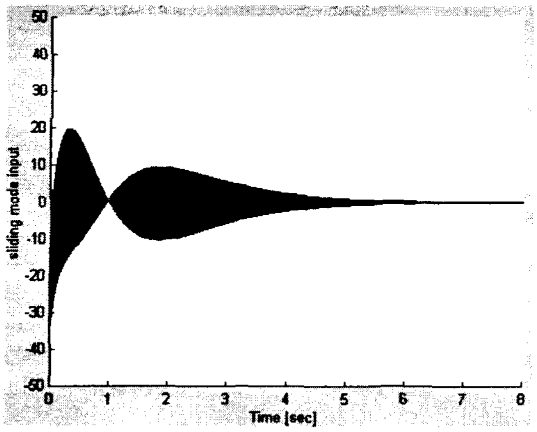

그림 8 제안된 슬라이딩 모드 제어의 제어 입력
Fig. 8 The control input of proposed sliding mode control

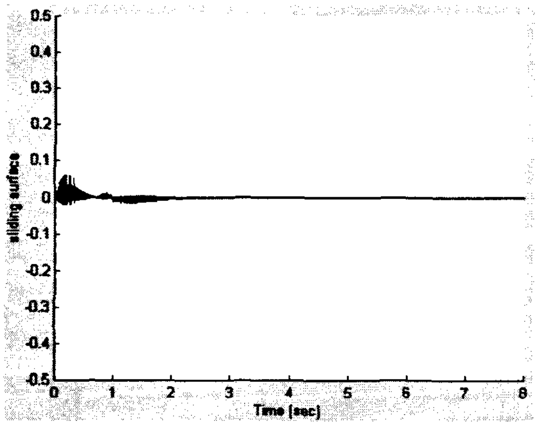

그림 9 제안된 슬라이딩 제어의 슬라이딩 평면
Fig. 9 The sliding surface of proposed sliding mode control

5. 결 론

본 논문에서는 파라미터 불확실성이 존재하는 비선형 계통에 대하여 궤환 선형화 이론을 적용시키기 위해서 슬라이딩 모드 제어 기법을 도입하였다. 제안된 슬라이딩 평면에 의해 설계되는 계통의 상태는 비선형 계통의 공칭 계통에 대해 궤환 선형화 이론이 적용된 계통의 동특성을 가질 수 있다는 것을 입증하였다. 즉, 궤환 선형화 기법을 공칭 제어기로 사용함으로써 파라미터 불확실성이 존재하는 비선형 계통에 대해서도 공칭 계통의 동특성을 따라갈 수 있는 제어기를 설계하였으며, 가상 상태의 초기값을 적절하게 선택함으로써 슬라이딩 평면으로의 도달기간을 제거할 수 있다.

감사의 글

본 논문은 2003년도 창원대학교 연구교수 연구비와 과학기술부·한국과학재단 지정 창원대학교 공작기계기술연구센터의 지원에 의한 것입니다.

참 고 문 헌

[1] Jean-Jacques E. Slotine, Applied Nonlinear Control, PRENTICE-HALL, New Jersey, 1991.
[2] A. Isidori, Nonlinear Control Systems, An Introduction, New York, Springer-Verlag, 1985.
[3] S. S. Sastry and A. Isidori, "Adaptive control of linearizable system," IEEE Transactions on Automatic Control, Vol AC-34, pp.1123-1131, 1989.
[4] J. Y. Hung, W. Gao, J. C. Hung, "Variable structure control: A survey," IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. 40, No.1 pp.2-22, 1993.
[5] V. I. Utkin, Sliding modes and their application in variable structure systems, Moscow, Mir Publishers,1978.
[6] U. Itkis, Control systems of variable structure, JOHNWILLY & SONS, New York, 1976.
[7] S. B. Choi, D. W. Park and S. Jayasuriya, "A Time-varying sliding surface for fast tracking control of second-order uncertain systems," Automatica, Vol.30, No.5, pp.899-904, 1994.
[8] S. B. Choi, C. C. Cheong, and D. W. Park, "Moving Switching Surfaces for Robust Control of Second-Order Variable Structure Systems," International Journal of Control, Vol.58, No.1, pp. 229-245, 1993.
[9] A. S. I. Zinober, E. El-Ghezawi and S. A. Billings, "Multi variable structure adaptive model following control systems," IEE Proceeding, vol.129, no.1, pp.7-12, 1982.
[10] G. Ambrosino. G. Celentano. and F. Garofala, "Variable structure model reference adaptive control systems," International Journal of Control, Vol.39, pp.1339-1349, 1984.
[11] J. A. Burton and A. S. I. Zinober, "Continuous approximation of variable structure control," International Journal of systems and science, Vol.17, No.6, pp.875-885, 1986.
[12] C. M. Dorling, and A. S. I. Zinober, "Two Approaches to Hyperplane Design in Multivariable Variable Structure Control Systems," International Journal of Control, Vol.44, No.1, pp. 65-82, 1986.
[13] T. L. Chem and Y. C. Wu, "Design of Integral Variable Structure Controller and Application to Electrohydraulic Velocity Servosystems," IEE Proceeding-D, Vol.138, No.5, pp.439-444, 1991.
[14] W. J. Wang and Y. T. Fan, "New Output Feedback Design in Variable Structure Systems," Journal of Guidance, Control and Dynamics, Vol.17, pp.337-340, 1994.
[15] J. J. Slotine, "Sliding Controller Design for Nonlinear Systems," International Journal of Control, Vol.40, No.2, pp.421-434, 1984.
[16] J. J. Slotine and S. S. Sastry, "Tracking control of nonlinear systems using sliding surfaces with application to robot manipulator," International Journal of Control, Vol.38, No.2, pp.465-492, 1983.
[17] B. R. Fernandez and J. K. Hedrick, "Control of multivariable nonlinear systems by the sliding mode method," International Journal of Control, Vol.46, pp.1019-1040, 1987.
[18] H. Sira-Ramirez, "Sliding regimes in general non-linear systems : a relative degree approach," International Journal

of Control, Vol.50, pp.1487-1506, 1989.
[19] S. Behtash, "Robust output tracking for non-linear systems," International Journal of Control, Vol.51, pp.1381-1407, 1990.
[20] H. Elmali and N. Olgac, "Robust output tracking control of nonlinear MIMO systems via sliding mode technique," Automatica, Vol.28, pp.145-151, 1992.
[21] S. K. Park, H. G. Ahn, "Robust controller design with novel sliding surface," IEE Proceeding Control Theory Applications, vol.146, no.3, pp.242-246, 1999.

저 자 소 개

김 민 찬 (金 玟 贊)
1971년 7월 13일생. 1996년 창원대학교 전기공학과 졸업. 1998년 동 대학원 전기전자제어공학과 졸업(공학석사). 2003년 동 대학원 전기전자제어공학과 졸업(공학박사)
Tel : 055-263-6885, Fax : 055-263-9956
E-mail : kmc710@kebi.com

이 재 동 (李 在 東)
1973년 3월 6일생. 1998년 창원대학교 전기공학과 졸업. 2000년 동 대학원 전기전자제어공학과 졸업(공학석사). 2000년~2002년 XKO-1 저속 통제기 세부계통 엔지니어로 근무. 2002년~현재까지 넥스원퓨처(주)에서 항공전자 시스템 엔지니어로 근무 중.
Tel : 031-288-9382, Fax : 031-285-1674
E-mail : jdyi@nex1.co.kr

박 승 규 (朴 勝 圭)
1960년 4월 15일생. 1984년 고려대학교 전기공학과 졸업. 1986년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1995년~1996년 영국 Strathclyde대 visiting scholar. 1990년~현재 창원대학교 전기공학과 교수
Tel : 055-279-7514, Fax : 055-263-9956
E-mail : skpark@changwon.ac.kr

곽 군 평 (郭 君 平)
1959년 3월 9일생. 1982년 고려대학교 전기공학과 졸업. 1985년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1990년~1997년 LG산전 연구소 CNC팀 팀장. 1998년~현재 창원대학교 전기공학과 부교수.
Tel : 055-279-7518, Fax : 055-263-9956
E-mail : kwak@sarim.changwon.ac.kr

안 호 균(安 鎬 均)
1958년 1월 14일생. 1981년 고려대학교 전기공학과 졸업. 1989년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 1992년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1992년~현재 창원대학교 전기공학과 교수
Tel : 055-279-7516, Fax : 055-263-9956
E-mail : ahog@sarim.changwon.ac.kr