
슬라이딩 섹터를 갖은 가변구조제어를 이용한 비선형시스템의 추적제어

한종길* · 손영수*

Tracking Control of Nonlinear System using the Variable Structure Control with Sliding Sector

Jong-kil Han* · Yong-su Son*

요 약

채터링 현상은 VSS의 주요한 약점이며 이 문제를 극복하기 위하여 많은 연구들이 발표되었다. 슬라이딩 섹터 이론이 최근에 발표되었으며, 섹터 안에서 제어입력 없이 상태의 norm이 감소하고 상태가 섹터 안에 있는 동안에 상태의 norm은 영으로 수렴한다. 슬라이딩 섹터 이론은 기본적인 연구단계에 있으며 선형시스템에 대하여 연구되어있다. 본 논문에서는 슬라이딩 섹터를 이용하여 불안정한 비선형시스템의 추적제어하는 새로운 방식을 제안하며 슬라이딩 섹터에 리아프노프 함수를 이용하여 안정도를 분석한다. 역진자 시스템에 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 제안한 슬라이딩 섹터 제어가 채터링을 줄일 수 있는 것을 확인한다.

ABSTRACT

Chattering phenomenon is still a large drawback of VSS. To overcome this problem, various approaches have been reported. A new notion of sliding sector has been proposed recently. Inside this sector, a kind of norm of the state decreases without control input. Therefore, so long as the state is constrained inside this sector, the norm of the state approaches to zero. The sliding sector theory is elementary study step and is studied about only linear systems. In this paper, new methods of the tracking control of unstable nonlinear systems using the sliding sector is proposed. This paper analyzes the stability, using Lyapunov function on the sliding sector. Through the computer simulations for an inverted pendulum system, it is verified that sliding sector control is capable to reduce the chattering.

키워드

Variable Structure Control, Sliding Sector Control, Sliding Sector, Nonlinear Control, Tracking Control

1. 서론

가변구조제어이론은 그 특징이 제어계의 구조가 상태전환면에 의해 변하는 이론으로 슬라이딩 면이 존재하게 되어 슬라이딩 면을 따라 채터링을 가지는 특징

때문에 슬라이딩모드제어라 말한이 어떤 값에서 다른 값으로 무한속도로 전환된다.

채터링은 실제응용에서 매우 바람직하지 않은 현상으로 매우 큰 입력 값이 순간적으로 변화하는 것이며 이것은 슬라이딩모드 제어시스템의 설계와 해석의 기

* 한려대학교 멀티정보통신공학과
심사완료일자 : 2007. 05. 23

접수일자 : 2007. 04. 17

본적인 가정 중 하나는 제어입력이 어떤 값에서 다른 값으로 무한속도로 전환된다고 하는 것이다. 그러나 실제의 시스템에 있어서는 물리적 한계 등으로 인해 구현하기 어렵다.

채터링은 모델링화되어 있지 않은 시스템의 고주파수 동특성이나 구조적 공진모드, 액추에이터의 시간지연, 표본화 효과 등을 야기해 제어성능을 저하시키는 원인이 된다. 이와 같은 채터링 현상은 슬라이딩모드 제어이론의 큰 단점으로 채터링 현상을 줄이거나 제거하기 위한 많은 연구들이 수행되었다.

예를 들면, 슬라이딩 평면에 경계층을 형성하고 경계층 내부에서 연속함수를 이용하는 방법, 보간법 또는 저역통과필터를 이용한 연속제어입력을 설계하는 방법, 잡음 관측기를 이용하는 방법등이 제안되었다 [1][2][3].

본 논문은 기본 이론인 슬라이딩 섹터 제어이론에 근거한 가변구조제어의 한 영역으로서 채터링 현상을 줄이기 위하여 슬라이딩 평면에 경계층을 형성하고 경계층 내부에 연속 함수를 사용하는 방법[4][5][6]을 새롭게 확장시킨 방법으로 아직은 미숙한 단계지만 이런 개념으로 접근하여 가변구조제어의 장점을 다 가지고 있고 채터링에 강한 새로운 개념의 가변구조 제어라고 할 수 있다. 본 논문에서는 슬라이딩 섹터 이론을 활용하여, 제어 이론의 중요한 문제인 유한 시간 안에 미리 선정된 추적에러 안에서 원하는 궤적에 따라서 상태가 이동하는 비선형 추적제어를 설계하고, 제안한 제어기를 일반적인 비선형 시스템의 예로 많이 사용되는 역진자 시스템에 적용하여 슬라이딩모드 제어의 문제점인 채터링 현상이 감소됨을 고찰한다.

II. 선형시스템에대한 슬라이딩 섹터제어

일반적인 다음과 같은 선형 시불변 단일입력 시스템을 고려한다.

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \tag{1}$$

여기서 상태는 $x(t) \in R^n$ 이며 입력은 $u(t) \in R^1$ 이고, A, B 는 적당한 크기의 상수행렬이고, (A, B) 는 제어 가능하다. 그리고 상태 $x(t)$ 는 측정 가능하다고

가정한다.

시스템의 상태에 대한 P-norm $\|\cdot\|_P$ 을 다음과 같이 정의한다.

$$\|x\|_P = (x^T P x)^{1/2}, x \in R^n \tag{2}$$

여기서 $P \in R^{n \times n}$ 는 positive definite symmetric 행렬이다.

Lyapunov 후보함수와 같은 모습을 가진 P-norm의 제곱은 다음과 같이 표시된다.

$$L(t) = \|x\|_P^2 = x^T P x > 0, \forall x \in R^n, x \neq 0 \tag{3}$$

만약 시스템(1)에 입력이 없을 때 안정하다면, 다음 식을 만족하는 P 를 찾을 수 있다.

$$\dot{L}(t) = x^T (A^T P + P A) x \leq 0, \forall x \in R^n \tag{4}$$

그러나 시스템 (1)에 입력이 없을 때 불안정하다면, 위 식은 보장할 수 없다. 불안정한 시스템에서는 어떤 $x(t) \in R^n$ 에 대하여 $\dot{L} \geq 0$ 이고 어떤 $x(t) \in R^n$ 에 대하여 $\dot{L} \leq 0$ 이 가능하다. 그래서 입력이 없을 때 P-norm $\|x\|_P$ 이 감소하는 특별한 영역을 정의하고 이것을 슬라이딩 섹터(sliding sector)라고 하며 아래와 같이 정의한다.

슬라이딩 섹터는 R^n 의 부분집합으로 시스템에 제어입력이 없을 때 (3)의 Lyapunov 후보함수의 미분 값이 0보다 작도록 다음과 같이 정의한다.

$$S_{act} = \{x | \dot{L}(t) = \frac{d}{dt} (x^T P x) = x^T (A^T P + P A) x \leq -x^T R x, x \in R^n\} \tag{5}$$

여기서 $R \in R^{n \times n}$ 은 positive semidefinite symmetric 행렬이다.

제어 입력이 없을 때, 슬라이딩 섹터 안에서 시스템 (1)의 P-norm $\|x\|_P$ 는 (6)을 만족하기 때문에 감소한다. 이것은 슬라이딩 섹터 안에 있을 때 제어 입력이 없이 상태가 0으로 수렴됨을 의미한다.

$$\dot{L}(t) \leq -x^T R x \leq 0, \quad \forall x \in S_{cst} \quad (6)$$

정리 : (5)에 정의한 슬라이딩 섹터는 다음과 같이 간단하게 표시한다.

$$S_{cst} = \{x \mid |s^2(x)| \leq w^2(x), x \in \mathbb{R}^n\} \\ = \{x \mid |s(x)| \leq |w(x)|, x \in \mathbb{R}^n\} \quad (7)$$

여기서 $C = B^T P$

$$s(x) = Cx(t) = B^T P x(t), \\ w(x) = \sqrt{x^T(t) H x(t)} \\ H = Q - R \geq 0 \quad (8)$$

증명 :

슬라이딩 섹터를 다음과 같은 최적제어의 Riccati 방정식을 사용하여 설계하면, 다음과 같다.

$$A^T P + PA - PBB^T P = -Q \quad (9)$$

여기서 $Q \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 은 대칭(symmetric), 양의 정부호(positive definite)행렬이며, 시스템이 제어 가능하다면 Riccati 방정식의 해 $P \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 는 존재한다. 해 P 를 P-norm으로 사용하면, 제어입력에 없을 때 슬라이딩 섹터(5)는 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\dot{L}(t) = \frac{d}{dt}(x^T(t) P x(t)) \\ = x^T(t) (A^T P + PA) x(t) \\ = x^T(t) PBB^T P x(t) - x^T(t) Q x(t) \\ \leq -x^T(t) R x(t) \quad (10)$$

결국 (10)을 정리하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$x^T(t) PBB^T P x(t) \leq x^T(t) (Q - R) x(t) \quad (11)$$

제어 가능한 시스템에 대하여, (9)의 Riccati 방정식의 해 P 를 P_norm으로 정의하고, $H = Q - R \geq 0$ 이 되도록 R 값을 선택하면 슬라이딩 섹터 (5)는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$s^2(x) = x^T(t) PBB^T P x(t)$$

$$w^2(x) = x^T(t) (Q - R) x(t) \quad (12)$$

여기서 $C = B^T P$

$$s(x) = Cx(t) = B^T P x(t), \\ w(x) = \sqrt{x^T(t) H x(t)} \\ H = Q - R \geq 0 \quad (13)$$

슬라이딩 섹터(7) 안에서 제어입력 없을 때 Lyapunov 후보함수 $L(t)$ 의 도함수는 다음 상태를 만족한다.

$$\dot{L}(t) = \frac{d}{dt}(x^T(t) P x(t)) \\ = x^T(t) PBB^T P x(t) - x^T(t) Q x(t) \\ = x^T(t) PBB^T P x(t) - x^T(t) H x(t) \\ \quad - x^T(t) R x(t) \\ = s^2(x) - w^2(x) - x^T(t) R x(t) \\ \leq -x^T(t) R x(t), \forall x(t) \in S_{cst} \quad (14)$$

단일입력인 경우 $s(x)$ 는 x 에 대하여 선형 함수이며, $w(x)$ 는 x 에 대하여 비선형 함수이고, 결국 Riccati 방정식을 사용하여 입력이 없을 때 안정한 비선형 슬라이딩 섹터를 설계하였고 이것은 제어법칙을 설계하는데 쉬운 단순한 슬라이딩 섹터이다.

III. 비선형 시스템에 대한 추적제어 법칙

본 장에서는 선형 시스템에 대한 제어기인 슬라이딩 섹터 제어에 대하여 비선형 시스템을 다루며, 최적제어의 Riccati 방정식을 도입하여 설계한 슬라이딩 섹터에 적용하여 추적 제어기를 설계한다.

일반적인 불확실한 비선형 동역학 방정식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\dot{x}(t) = (A(t, x) + \Delta A(t, x))x(t) + f(t, x, u) \\ \quad + (B + \Delta B(t, x, u))u \\ = (A_L + A_R(t, x) + \Delta A(t, x))x(t) + f(t, x, u) \\ \quad + (B + \Delta B(t, x, u))u \quad (15)$$

여기에서 $x(t) \in R^n$, $u(t) \in R$ 이고, A_L 은 $A(t,x)$ 의 선형화한 항이고, $A_R(t,x)$ 는 $A(t,x)$ 의 선형화 후 나머지 항이며, $\Delta A(t,x)$ 는 시스템의 불확실한 항이고, $f(t,x,u)$ 는 시스템의 모든 외란을 고려한 항이며, ΔB 는 입력의 불확실성을 고려한 항이다.

모든 선형화 후 나머지 항 및 불확실성과 잡음이 정합조건을 만족한다고 가정하면, (16)은 존재한다.

$$\begin{aligned} A_R(t,x) &= Br(t,x) \\ \Delta A(t,x) &= Bh(t,x,u) \\ \Delta B(t,x)u &= Bw(t,x,u) \\ f(t,x,u) &= Bd(t,x,u) \end{aligned} \quad (16)$$

위와 같은 가정 하에 (15)는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= A_Lx(t) + Bu(t) + B(r(t,x)x(t) \\ &\quad + h(t,x,u)x(t) + w(t,x,u) + d(t,x,u)) \end{aligned} \quad (17)$$

여기에서 $\eta(t,x,u)$ 에 대하여 다음과 같은 함수가 존재한다고 가정한다.

$$\begin{aligned} \eta(t,x,u) &= r(t,x)x(t) + h(t,x,u)x(t) + w(t,x,u) \\ &\quad + d(t,x,u) \\ \rho(x) &\geq |\eta(t,x,u)| \end{aligned} \quad (18)$$

(17)에 식(18)을 대입하면 다음과 같이 쓰여 질 수 있다.

$$\dot{x}(t) = A_Lx(t) + Bu(t) + B\eta(t,x,u) \quad (19)$$

제어 이론에서 중요한 문제 중에 하나는 상태 x 가 원하는 궤도 x_d 을 유한 시간에 미리 선정한 추적에러 안에서 잘 추적하도록 시스템을 제어하는 것이다.

추적제어를 위하여 다음과 같은 식으로 표현되는 새로운 $s(x)$ 을 정의한다.

$$\Omega = e(x,t) | s(x) = Ce(x,t) = 0 \quad (20)$$

여기서 $e = x - x_d$ 는 추적오차이며, x_d 는 원하는

궤도이다.

추적제어에 맞는 슬라이딩 섹터에 근거한 슬라이딩 섹터 제어법칙은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} &\frac{e^T P(\dot{x}_d - A_Lx_d)}{e^T PB} - \text{sgn}(s(t))\rho(x) \\ x \in S_{cd} \quad &\text{and} \quad e^T PB \neq 0 \\ x \in S_{cd} \quad &\text{and} \quad e^T PB = 0 \\ &-(CB)^{-1}(CA_Lx - C\dot{x}_d + ks(x)) - \text{sgn}(s(x))\rho(x) \\ x \notin S_{cd} \end{aligned} \quad (21)$$

여기서 $CB > 0$ 는 역행렬이 존재하며, $k > 0$ 는 충분히 커다란 수이다.

제어법칙에 대한 증명은 두 단계를 통하여 증명한다. 첫 번째로 유한 시간 안에 슬라이딩 섹터 밖에서 슬라이딩 섹터 안으로 상태가 수렴함을 보이며, 두 번째로는 슬라이딩 섹터 안에서 안정성을 보인다.

첫 번째 : 슬라이딩 섹터 밖에서
다음과 같이 Lyapunov 함수를 설정하였다.

$$V_1 = \frac{1}{2}s^2(x) \quad (22)$$

Lyapunov 함수의 도함수는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= s(x)\dot{s}(x) \\ &= s(x)C\dot{e} \\ &= s(x)C(A_Lx + Bu + B\eta - \dot{x}_d) \\ &= -ks^2(x) \end{aligned} \quad (23)$$

이것은 슬라이딩 섹터 밖에서 Lyapunov 함수가 감소함을 의미하며, 시스템의 상태가 슬라이딩 섹터 안으로 이동할 때까지 $|s(x)|$ 가 감소하는 것을 의미한다. 결국 유한 시간 안에 슬라이딩 섹터의 밖에서 안쪽으로 수렴할 것이다.

두 번째 : 슬라이딩 섹터 안에서

다음과 같이 Lyapunov 함수를 설정하였다.

$$V_2 = e^T P e(x) \quad (24)$$

Lyapunov 함수의 도함수는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= \dot{e}^T P e + e^T P \dot{e} \\ &= (A_L x + B u + B \eta - \dot{x}_d)^T P e \\ &\quad + e^T P (A_L x + B u + B \eta - \dot{x}_d) \\ &= x^T A_L^T P e + e^T P A_L x + 2e^T P (B u + B \eta - \dot{x}_d) \\ &= e^T (A_L^T P + P A_L) e + 2e^T P (A_L x_d + B u + B \eta - \dot{x}_d) \\ &\leq s^2(x) - w^2(x) - e^T R e \\ &\quad + 2e^T P (A_L x_d + B u + B \eta - \dot{x}_d) \\ &\leq -e^T R e + 2e^T P (A_L x_d + B u + B \eta - \dot{x}_d) \\ &\leq -e^T R e \end{aligned} \quad (25)$$

이것은 Lyapunov 함수의 미분값이 0보다 작으므로, 입력 없이 안정한 영역인 슬라이딩 섹터 안에서 Lyapunov 함수 V_2 가 감소함을 의미하며, 에러가 0으로 수렴됨을 의미한다.

슬라이딩 섹터 제어의 정상상태에서는 섹터영역의 폭이 0에 가깝기 때문에 슬라이딩 섹터의 밖에 상태가 존재하며, $sgn(s(x))$ 함수 제어입력 때문에 채터링 현상이 발생한다. 이 채터링을 감소시키기 위해서 고정된 경계층을 고려하고, $sgn(\cdot)$ 대신 $sat(\cdot)$ 를 적용하여 제어법칙을 정의하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} &\frac{e^T P (\dot{x}_d - A_L x_d)}{e^T P B} - sat(s(t)/\Phi) \rho(x) \\ x &\in S_{ct} \quad \text{and} \quad e^T P B \neq 0 \\ x &\in S_{ct} \quad \text{and} \quad e^T P B = 0 \\ &-(CB)^{-1} (CA_L x - C\dot{x}_d + k s(x)) - sat(s(t)/\Phi) \rho(x) \\ x &\notin S_{ct} \end{aligned} \quad (26)$$

여기서

$$sat(s(t)/\Phi) = \begin{cases} s(t)/\Phi & \text{if } |s(t)/\Phi| \leq 1 \\ sgn(s(t)/\Phi) & \text{otherwise} \end{cases}$$

Φ 는 고정된 경계층 폭이다.

IV. 컴퓨터 시뮬레이션

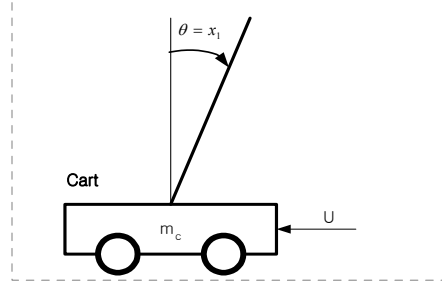


그림 1. 도립진자 시스템

Fig. 1 Inverted pendulum system

본 장에서는 제안된 제어법칙에 대한 타당성을 보이기 위해 일반적인 비선형 시스템의 예로 많이 사용되는 그림 1과 같은 역진자 시스템에 대한 제어결과를 살펴본다.

Euler-Lagrange 방법을 이용하여 위와 같은 역진자 시스템의 동력학방정식을 유도하면 다음과 같다. 여기서는 역진자의 각도만을 제어대상으로 생각하여 cart의 위치는 논외로 한 것이다.

$$\begin{aligned} \ddot{\theta} &= (g \sin \theta - \cos \theta (\frac{ml}{m_c + m} \theta^2 \sin \theta - \frac{1}{m_c + m} \\ u(t))) / (\frac{4}{3} l - \frac{ml}{m_c + m} \cos^2 \theta) \end{aligned} \quad (27)$$

$x_1 = \theta$ 그리고 $x_2 = \dot{\theta}$ 로 놓고 동력학방정식을 다시 쓰면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= \frac{g \sin x_1 - \cos x_1 \frac{ml}{m_c + m} x_2^2 \sin x_1}{\frac{4}{3} l - \frac{ml}{m_c + m} \cos^2 x_1} \\ &\quad + \frac{\cos x_1}{m_c + m} u(t) \end{aligned} \quad (28)$$

여기서 $x_1 = \theta$, $x_2 = \dot{\theta}$ 는 각각 역진자의 각도와 각속도를 나타내며 l 은 역진자의 길이를 나타낸다. 또한 g 는 중력가속도를, m 은 역진자의 질량을, m_c 는 cart의 질량을, 그리고 $u(t)$ 는 cart에 가해지는 입력을 각각 나타낸다.

(28)를 평형점 0에서 테일러 급수에 의하여 선형화하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax(t) + bu(t) \\ &= \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} u(t) \end{aligned} \quad (29)$$

여기서

$$\begin{aligned} a_{11} &= \left. \frac{\partial \dot{x}_1}{\partial x_1} \right|_{x_1=0, x_2=0} = 0 \\ a_{12} &= \left. \frac{\partial \dot{x}_1}{\partial x_2} \right|_{x_1=0, x_2=0} = 1 \\ a_{21} &= \left. \frac{\partial \dot{x}_2}{\partial x_1} \right|_{x_1=0, x_2=0} \\ &= \frac{g}{(4/3)l - ml / (m_c + m)} \\ a_{22} &= \left. \frac{\partial \dot{x}_2}{\partial x_2} \right|_{x_1=0, x_2=0} = 0 \\ b_1 &= \left. \frac{\partial \dot{x}_1}{\partial u} \right|_{x_1=0, x_2=0} = 0 \\ b_2 &= \left. \frac{\partial \dot{x}_2}{\partial u} \right|_{x_1=0, x_2=0} \\ &= \frac{1/(m_c + m)}{(4/3)l - ml / (m_c + m)} \end{aligned}$$

시뮬레이션에 사용된 물리정수는 다음과 같다.

표 1. 역진자 시스템의 물리정수

Table 1. Physical constant of inverted pendulum system

매개변수	크기	단위
m	0.1	Kg
m_c	1.0	Kg
l	0.5	m
g	9.8	m/sec^2

(29)처럼 선형화된 시스템에 대한 슬라이딩 벡터는 다음과 같다.

$Q \in R^{n \times n}$ 은 대칭(symmetric), 양의 부호(positive definite)행렬이고, $R \in R^{m \times m}$ 은 대칭(symmetric), 양의 준정부호(positive semidefinite) 행렬이며 다음과 같은 값을 사용하였다.

$$Q = \begin{bmatrix} 10 & 0 \\ 0 & 10 \end{bmatrix} \quad R = \begin{bmatrix} 4.4 & 0 \\ 0 & 4.4 \end{bmatrix} \quad (30)$$

Riccati 방정식 (9)을 만족하는 P 는 다음과 같다.

$$P = \begin{bmatrix} 71.1281 & 15.0431 \\ 15.0431 & 4.32643 \end{bmatrix} \quad (31)$$

따라서 슬라이딩 벡터는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} s(e) &= Ce = B^T P e \\ &= [22.0143 \quad 6.3314] e \\ w(e) &= \sqrt{e^T(Q-R)e} = \sqrt{6.4e_1^2 + 6.4e_2^2} \end{aligned} \quad (32)$$

그리고 $\rho = 0.2$, $k = 2$, ϕ 는 0.004로 제어기 변수로 잡았다. 시스템의 외란과 불확실항의 값이 $0.1\sin(10t)$ 이다는 가정 하에 컴퓨터 시뮬레이션을 하여본 결과를 그림 2에서 그림 5까지 나타내었다. 그림 2은 시스템의 상태 x_1 의 출력을 나타내고 있으며, 초기조건 $x_1 = 0.1$, $x_2 = 0$ 에서 원하는 궤적으로 잘 수렴함을 알 수 있다. 그림 3은 시스템의 입력을 나타낸 시뮬레이션 결과로 그림에서 보는 바와 같이 제어 이득에서 처음에 원하는 궤적에 수렴하는 동안에 약간의 채터링이 있으나 수렴 후에는 슬라이딩 제어의 특징인 채터링을 거의 볼 수 없다. 그림 4는 e_1, e_2 의 상태궤적을 나타낸 그림이며 0으로 잘 수렴됨을 볼 수 있다. 그림 5는 슬라이딩 평면이다.

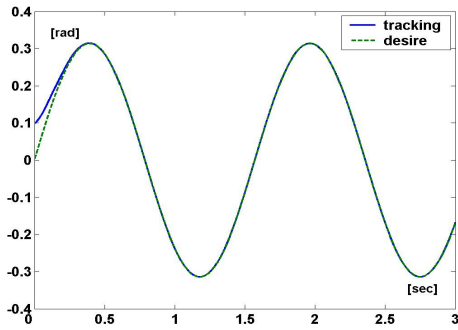


그림 2. 상태 궤적
Fig. 2 State trajectory

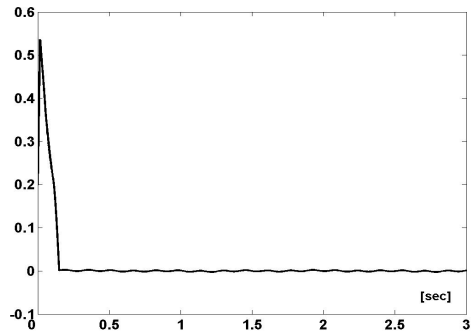


그림 5. 슬라이딩 평면
Fig. 5 Sliding surface S

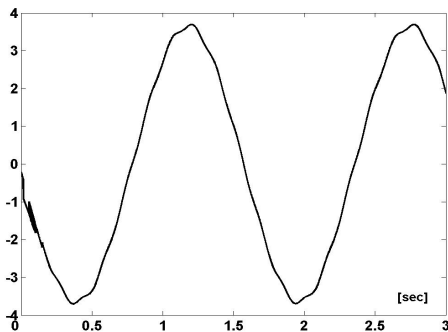


그림 3. 제어입력
Fig. 3 Control input

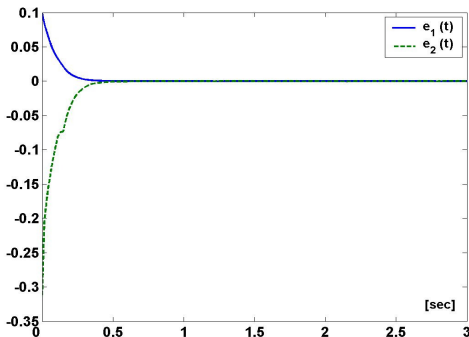


그림 4. 오차 $e_1(t)$, $e_2(t)$
Fig. 4 State errors $e_1(t)$, $e_2(t)$

V. 결론

슬라이딩 제어는 슬라이딩 평면에 상태를 부딪히도록 제어함으로 채터링 현상이 발생하는데, 이로 인하여 실제 시스템에 적용하기 용이하지 않다. 그러나 슬라이딩 섹터를 사용한 제어기는 슬라이딩 평면이 아닌 슬라이딩 영역을 뚫으므로 채터링 현상을 현저하게 줄일 수 있다. 그러나 아직은 슬라이딩 섹터 이론이 초보적인 단계로서 기존의 연구에서는 단지 선형시스템에 대한 연구와 평형점에 대한 위치제어 밖에 없다.

본 논문에서는 슬라이딩 섹터 이론을 활용하여, 제어 이론의 중요한 문제인 유한 시간 안에 미리 선택한 추적에러 안에서 원하는 궤적에 따라서 상태가 이동하는 비선형 추적제어기를 설계하였고, 비선형시스템에 적용하여 슬라이딩 모드 제어의 문제점인 채터링 현상이 현저하게 감소됨을 고찰하였다.

참고 문헌

- [1] J. J. E. Slotine and S. S. Sastry, "Tracking control of nonlinear systems using sliding surfaces with application to robot manipulators", *Int. J. Control*, Vol. 38, pp.465-492, 1983.
- [2] G. Bartolini, A. Ferrara and E. Usai, "Chattering avoidance by second order sliding mode control",

- IEEE Trans. Automat. Control, Vol. 43, pp.241-246, 1998.
- [3] C. G. Lhee, J. J. Lee, and H. S. Ahn, "Sliding -like fuzzy logic control with self tuning the dead zone parameters", 1999 IEEE Int. Fuzzy Systems Control, pp.544-549, 1999.
- [4] Y. Pan, K. Furuta and S. Hatakeyama, "Invariant sliding sector for variable structure control", Proc. of the 38th Conf. Decision and Control, pp.5152-5157, 1999.
- [5] K. Furuta and Y. Pan, "Design of discrete -time vss controller based on sliding sector", 13th Tr. World Con. IFAC, pp.487-492, 1996.
- [6] K. Furuta, S. Hatakeyama and Y. Pan, "VS controller design for continuous system from sampled data", Proc. of Amer. Control Conf., pp.1032-1035, 1999.

저자 소개



한종길(Jong-kil Han)

1992년 전북대학교 전자공학과 (공학사)
1994년 전북대학교 전자공학과 (공학석사)
2002년 전북대학교 전자공학과 (공학박사)
1997년 ~ 현재 한려대학교 멀티정보통신

학과 교수

※ 관심분야 : 적응제어, 슬라이딩제어, 진화연산알고리즘, 슬라이딩 섹터제어, 퍼지제어 등



손영수(Young-su Son)

1988년 조선대학교 전산통계학과 (이학사)
1991년 조선대학교 전산통계학과(이학석사)
1999년 조선대학교 전산통계학과 (이학

박사)

1996년 ~ 현재 한려대학교 멀티정보통신학과 교수

※ 관심분야 : 프로그래밍어론, 데이터베이스, 인공지능, 퍼지제어 등