

## 비 간섭 슬라이딩모드제어에 관한 연구

남택근† · 박재식\* · 노영오\*\* · 안병원\*\*

(원고접수일 : 2004년 8월 9일, 심사완료일 : 2004년 10월 20일)

### A Study on the Decoupling Sliding Mode Control

Taek-Kun Nam† · Jae-Shik Park\* · Young-Oh Roh\*\* · Byung-Won Ahn\*\*

**Abstract** : In this paper, a trajectory tracking problems using SMC(sliding mode control) is presented. In the conventional method, SMC has been applied to linear systems and the output matrix  $C$  has to satisfy a restrictive condition that  $CB$  is nonsingular. Under suitable assumptions, decoupling SMC can be adapted to remove the restriction mentioned above. The proposed control strategy is applied to trajectory tracking control and simulations results are given to demonstrate the effectiveness of the proposed control scheme.

**Key words** : Decoupling control(비 간섭제어), Sliding mode control(슬라이딩모드제어), Tracking control(추종제어), Invariant zero(불변영점)

#### 1. 서 론

슬라이딩 모드제어기법은 선형, 비선형 시스템에 적용 가능한 강인한 제어기법으로서 다양한 분야에 걸쳐 널리 활용되고 있다. 슬라이딩모드제어를  $(C, A, B)$ 로 표현되는 선형시스템에 적용할 경우  $\sigma = Cx$  형식의 스위칭 함수를 이용한 bang-bang 제어가 행해지게 된다. 이러한 경우  $CB$ 가 정칙이고 시스템  $(C, A, B)$ 의 불변영점이 안정일 필요가 있다. 슬라이딩모드제어를 레귤레이터(regulator)에 사용할 경우  $C$ 는 자유롭게 고를 수 있고 이와 같은  $C$ 를 찾는 것은 어렵지 않다<sup>[1]</sup>. 하지만 추종제어를 행할 경우  $\sigma$ 를 제어오차와 일

치시키지 않으면 안되는 관계로  $C$ 는 자유롭게 선정할 수가 없게 되어 일반적으로  $CB$ 가 정칙인 조건은 성립되지 않게 된다.

본 논문에서는  $CB$ 가 정칙인 조건을 만족하지는 않지만  $(C, A, B)$ 가 상태 피드백에 의해 비 간섭화 가능한 조건을 만족하는 경우에 대하여 SMC(sliding mode control)기법을 적용한 추종제어기의 설계방법을 제안한다. 상태 피드백기법에 의한 비 간섭제어는 1960년대에 활발하게 연구가 진행되었다<sup>[2],[3]</sup>. 특히 선형시스템의 구조에 대한 연구가 중심적으로 진행되었고 많은 연구들이 산업계에 실제적으로 적용되기도 하였다. 하지만 선형시스템에 근간을 둔 이러한 제어방식은

† 책임저자(목포해양대학교 기관시스템공학부), E-mail : tknam@mmu.ac.kr, T : 061)240-7310

\* 한국해양대학교

\*\* 목포해양대학교 기관시스템공학부

실제시스템이 가지고 있는 비선형성 및 파라미터의 불확실성에 대하여 피할 수 없는 약점을 가지고 있다. 슬라이딩 모드제어기법을 적용함으로써 이러한 문제점을 극복할 수 있으며 본 연구에서는  $(C, A, B)$ 가 상태 피드백에 의해 비 간섭화 가능한 조건을 만족하는 경우의 SMC추종제어기법을 제안하였다. 제어방법의 유용성을 검증하기 위하여 수치시뮬레이션을 행하였고 본 논문에서 제안한 제어방법은 슬라이딩모드제어기법의 발전 및 실제 응용에 있어서도 의미가 있다고 생각되어진다.

## 2. 문제설정

본 연구에서 고려하고 있는 제어대상 시스템은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) + Bg(x, t) \\ y(t) &= Cx(t) \end{aligned} \quad (1)$$

여기에서  $x \in R^n$ 는 상태벡터,  $u \in R^p$ 는 제어입력,  $y \in R^p$ 는 출력이다.  $A$ 와  $B$ 는 각각  $A(n \times n)$ ,  $B(n \times p)$ 이고

$$C(p \times n) = \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ \vdots \\ c_p \end{bmatrix} \quad (2)$$

로 하고  $g(x, t)(p \times 1)$ 는 불확정성과 비 선형항을 포함하는 벡터이며 그 크기가 기지(既知)인 스칼라함수  $M(x, t)$ 에 의해

$$|g(x, t)| \leq M(x, t) \quad (3)$$

로 그 크기를 알 수 있는 것으로 가정한다. 슬라이딩모드제어를 추종제어에 응용할 경우 스위칭변수  $\sigma$ 는 제어오차  $e(t)$ 로 정하여

$$\sigma(t) = e(t) = y(t) - r(t) \quad (4)$$

로 정의한다. (4)에서 목표치  $r(t)$ 는 유계(有界)이고 연속적인 함수로 가정한다. 종래의 슬라이딩모드제어에서는  $CB$ 가 정칙행렬인 조건이 요구되고 있다. 본 논문의 목적은 이러한 제약을 없애는 것이다. 논문에서의 식 전개를 용이하게 하기위해 우선  $|CB| \neq 0$ 를 만족하는 경우를 살펴본다.

$|CB| \neq 0$ 인 경우  $\sigma$ 의 수렴성을 증명하기 위해 리아프노프 함수의 후보로서

$$V = \sigma^T \sigma / 2 \quad (5)$$

를 선정하고

$$\dot{\sigma} = \dot{y} - \dot{r} = CAx + CBu + CBg - \dot{r} \quad (6)$$

로부터  $V$ 의 시간에 대한 미분은

$$\dot{V} = \sigma^T \dot{\sigma} = \sigma^T (CAx + CBu + CBg - \dot{r}) \quad (7)$$

가 된다.  $|CB| \neq 0$ 이므로 조작량을

$$u = -(CB)^{-1}CAx + (CB)^{-1}\tilde{u} \quad (8)$$

로 고려하면

$$\dot{V} = \sigma^T (\tilde{u} + CBg - \dot{r}) \quad (9)$$

가 되므로  $\tilde{u}$ 를

$$\tilde{u} = -k \frac{\sigma}{|\sigma|} \quad (10)$$

와 같은 bang-bang 제어입력으로 하고, 계인을

$$k > M|CB| + |\dot{r}| \quad (11)$$

과 같이 정하면

$$\begin{aligned} \dot{V} &= -k|\sigma| + \sigma^T CBg - \sigma^T \dot{r} \\ &\leq |\sigma|(-k + M|CB| + |\dot{r}|) < 0 \end{aligned} \quad (12)$$

이 성립되므로 La-salle의 정리로부터  $\dot{V} \equiv 0$ 을 만족시키는 최대 불변집합은  $\sigma \equiv 0$ 가 되어  $\sigma \rightarrow 0, \dot{\sigma} \rightarrow 0, (t \rightarrow \infty)$ 가 얻어진다.

$\sigma \rightarrow 0$ 로부터 추종오차는 0에 수렴하지만 내부 상태변수의 유계성(有界性)을 살펴보기 위해 등가선형시스템(equivalent linear system)이 필요하게 된다. 이를 위해  $\dot{\sigma} = 0$ 을 (6)에 대입하여

$$u = -(CB)^{-1}CAx - g + (CB)^{-1}\dot{r} \quad (13)$$

을 얻는다. (13)을 (1)에 대입함으로써 등가선형시스템은

$$\dot{x} = (A - B(CB)^{-1}CA)x + B(CB)^{-1}\dot{r} \quad (14)$$

가 되어 외란성분  $g$ 와는 독립적으로 분리되는 것을 알 수 있다. 다음으로 등가선형시스템의 상이 변환을 위해  $C$ 의 적당한 보조기저  $W(n-p \times n)$ 를

$$T = \begin{bmatrix} C \\ W \end{bmatrix} \quad (15)$$

가 정칙( $|T| \neq 0$ )이 되도록 정한 후,  $C(A - B(CB)^{-1}CA) = 0$ 인 것을 이용하면

$$T(A - B(CB)^{-1}CA) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} T \quad (16)$$

가 성립된다. 단,  $A_{21}, A_{22}$ 는 적당한 행렬이다. 다음으로  $q = \mathbb{R}$ 로 정의하고

$$\begin{bmatrix} \sigma \\ q \end{bmatrix} = Tx - \begin{bmatrix} r \\ 0 \end{bmatrix} \quad (17)$$

의 변수변환을 등가선형 시스템 (14)에 적용하면

$$\begin{bmatrix} \dot{\sigma} \\ \dot{q} \end{bmatrix} = T\dot{x} - \begin{bmatrix} \dot{r} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma \\ q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ A_{21}r + WB(CB)^{-1}\dot{r} \end{bmatrix} \quad (18)$$

을 얻는다. 이것으로부터 식(10)의 제어입력으로  $\alpha(t) = 0$ 이 달성되었다더라도  $A_{22}$ 가 안정되지 않으면 상태변수  $q$ 의 유계성은 보증되지 않는 것을 알 수 있다. 즉, 상태변수의 유계성은  $A_{22}$ 의 안정성으로 결정되게 된다. 아울러  $A_{22}$ 의 고유치는 시스템  $(C, A, B)$ 의 불변영점(invariant zero)이 된다. 왜냐하면

$$\begin{bmatrix} I_n & 0 \\ C & sI_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A - sI_n & B \\ C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_n & 0 \\ -(CB)^{-1}CA & I_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A - B(CB)^{-1}CA - sI_n & B \\ 0 & CB \end{bmatrix} \quad (19)$$

가 성립되므로 양변의 행렬식을 계산하면

$$s^p \begin{vmatrix} A - sI_n & B \\ C & 0 \end{vmatrix} = |CB| |A - B(CB)^{-1}CA - sI_n| \quad (20)$$

을 얻는다. 한편, 식(16)은

$$T(A - B(CB)^{-1}CA)T^{-1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \quad (21)$$

가 되어  $|A - B(CB)^{-1}CA - sI_n| = 0$ 의 근이  $p$ 개의 원점근과  $A_{22}$ 의 고유치로 되어 있는 것을 알 수 있다. 따라서  $A_{22}$ 의 고유치는

$$\begin{vmatrix} A - sI_n & B \\ C & 0 \end{vmatrix} = 0 \quad (22)$$

의 근 즉, 식(1)의 불변영점이 된다.

### 3. 제어기 설계

위에서는  $|CB| \neq 0$ 를 만족하는 경우의 SMC (Sliding mode control)를 이용한 추종제어기의 설계기법에 대해 살펴보았고 본 절에서는  $|CB| \neq 0$ 의 조건을 만족시키지는 않지만  $c_i (i = 1 \sim m)$ 에 대해

$$c_i B = 0, \dots, c_i A^{p_i-2} B = 0, c_i A^{p_i-1} B \neq 0 \quad (23)$$

가 성립되고 또한

$$B^* = \begin{bmatrix} c_1 A^{p_1-1} B \\ c_2 A^{p_2-1} B \\ \vdots \\ c_m A^{p_m-1} B \end{bmatrix} \quad (24)$$

가 정칙( $|B^*| \neq 0$ )인 경우에 대하여 추종제어기를 설계하고자 한다.

식(24)의 조건은 선형상태 피드백에 의하여 비간섭화제어가 가능하기 위한 필요충분조건으로 알려져 있다<sup>(9)</sup>. 이러한 경우에도 앞 절에서의  $C, r$ 을 대신하여

$$\tilde{C} = \begin{bmatrix} \tilde{c}_1 \\ \tilde{c}_2 \\ \vdots \\ \tilde{c}_m \end{bmatrix}, \quad \tilde{c}_i = a_1^i c_i + a_2^i c_i A + \dots + a_{p_i-1}^i c_i A^{p_i-2} + c_i A^{p_i-1} \quad (25)$$

$$\tilde{r} = \begin{bmatrix} \tilde{r}_1 \\ \tilde{r}_2 \\ \vdots \\ \tilde{r}_m \end{bmatrix}, \quad \tilde{r}_i = a_1^i r_i + a_2^i r_i^{(1)} + \dots + a_{p_i-1}^i r_i^{(p_i-2)} + r_i^{(p_i-1)}$$

를 고려해 보자. 단, 이하에서는  $|CB| \neq 0$ 이 성립되

지 않지만 목표치의 미분이 이용가능하고  $\tilde{r}_i$  가 계산 가능하다고 가정한다. 그리고 스위칭 평면을

$$\sigma = \tilde{C}x - \tilde{r} \quad (26)$$

로 놓고 2절에서 논의한 바와 같이 SMC를 적용하면

$$\tilde{C}B = B^* \quad (27)$$

가 되고, 제어입력을

$$u = -(\tilde{C}B)^{-1} \tilde{C}Ax + (\tilde{C}B)^{-1} \tilde{u} = -B^* \tilde{C}Ax + B^* \tilde{u} \quad (28)$$

과 같이 구성한다. 단,  $\tilde{u} = -k \frac{\sigma}{\|\sigma\|}$  이고 스위칭 계인  $k(x, t)$ 를

$$k(x, t) > \|B^*\| M(x, t) + \|\tilde{r}\| \quad (29)$$

와 같이 선택하면

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \sigma^T \dot{\sigma} \\ &= \sigma^T (\tilde{C}Ax + \tilde{C}Bu + \tilde{C}Bg - \dot{\tilde{r}}) \\ &= \sigma^T (\tilde{u} + B^*g - \dot{\tilde{r}}) \\ &= -k \|\sigma\| + \sigma^T B^*g - \sigma^T \dot{\tilde{r}} \\ &\leq \|\sigma\| (-k + \|B^*\| M + \|\dot{\tilde{r}}\|) < 0 \end{aligned} \quad (30)$$

가 성립되고 리아프노프정리에 의해  $\sigma(t) \rightarrow 0$ 가 얻어진다. 상기의 제어기에 의해 얻어지는 제어효과를 살펴보면 (23), (1)로부터

$$c_i \dot{x} = y_i, c_i Ax = y^{(1)}, \dots, c_i A^{p_i-1} x = y^{(p_i-1)} \quad (31)$$

이 얻어진다. 단,  $y^{(k)}, k \geq 0$ 는  $y$ 의 시간에 대한  $k$ 차 미분을 나타낸다. 따라서  $e_i(t) = y_i(t) - r_i(t)$ 로 두면,  $\sigma_i(t) = 0$ 로부터

$$\begin{aligned} \sigma_i(t) &= \tilde{c}_i x(t) - \tilde{r}_i(t) \\ &= a_1^i (y_i - r_i) + a_2^i (y_i^{(1)} - r_i^{(1)}) + \dots \\ &\quad + a_{p_i-1}^i (y_i^{(p_i-2)} - r_i^{(p_i-2)}) + (y_i^{(p_i-1)} - r_i^{(p_i-1)}) \\ &= a_1^i e_i + a_2^i e_i^{(1)} + \dots + a_{p_i-1}^i e_i^{(p_i-2)} + e_i^{(p_i-1)} \\ &= 0 \end{aligned} \quad (32)$$

를 얻을 수 있다. 식(32)에서  $a_1^i, a_2^i, \dots, a_{p_i-1}^i$ 는 Hurwitz안정조건을 만족하는 계수((37)의  $h_i(z)$ )이고, 이 안정성을 이용하면  $e_i^{(k)} = 0$  즉,

$$y_i^{(k)}(t) = r_i^{(k)}(t), \quad k \geq 0 \quad (33)$$

이 성립되어 제어목적이 달성되는 것을 알 수 있다.

다음으로 슬라이딩모드의 안정성에 대해 살펴보면 2절에서의 결과에 있어서  $C, r$  대신에  $\tilde{C}, \tilde{r}$ 이 되더라도 모두 만족되게 된다. 따라서 슬라이딩모드의 안정성은 시스템  $(\tilde{C}, A, B)$ 의 불변영점에 의해 결정된다.  $(\tilde{C}, A, B)$ 의 시스템 행렬은

$$\begin{bmatrix} A - zI & B \\ \tilde{C} & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_n & 0 \\ \alpha(z) & H(z) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A - zI & B \\ C & 0 \end{bmatrix} \quad (34)$$

가 성립 된다.

여기에서  $H(z), \alpha(z)$ 는

$$H(z) = \text{diag}(h_1(z), h_2(z), \dots, h_m(z)) \quad (35)$$

와

$$\alpha(z) = \begin{bmatrix} \alpha_1(z) \\ \alpha_2(z) \\ \vdots \\ \alpha_m(z) \end{bmatrix} \quad (36)$$

으로 주어진다. 단,

$$\begin{aligned} h_i(z) &= a_1^i + a_2^i z + \dots + a_{p_i-1}^i z^{p_i-2} + z^{p_i-1} \\ \alpha_i(z) &= c_i A^{p_i-2} + (z + a_{p_i-1}^i) c_i A^{p_i-3} + \\ &\quad (z^2 + a_{p_i-1}^i z + a_{p_i-1}^i) c_i A^{p_i-4} + \\ &\quad \dots + (z^{p_i-2} + a_{p_i-1}^i z^{p_i-3} + a_2^i) \end{aligned} \quad (37)$$

따라서  $(\tilde{C}, A, B)$ 의 불변영점이 안정되기 위한 필요충분조건은 식(37)로부터  $h_i(z) = 0 (i=1 \sim m)$ 가 모두 안정한 다항식이고  $(C, A, B)$ 의 불변영점이 모두 안정한 것이다.

### 4. 시뮬레이션

다음과 같은 시스템

$$G(s) = \left[ \begin{array}{c|c} A & B \\ \hline C & 0 \end{array} \right] = \left[ \begin{array}{c|c} \frac{2(s^2+5s+5)}{s^3+9s^2+23s+16} & \frac{2(s+2)}{s^3+9s^2+23s+16} \\ \hline \frac{2}{s^3+9s^2+23s+16} & \frac{s+4}{s^3+9s^2+23s+16} \end{array} \right] = \left[ \begin{array}{cc|cc} -4 & 2 & 0 & 2 & 0 \\ 1 & -3 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & -2 & 0 & 0 \\ \hline 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{array} \right] \quad (38)$$

에 대하여 출력  $y(t)$ 를 목표치

$$r(t) = [r_1, r_2]^T \quad (39)$$

에 추종하고자 하는 제어를 설계하고자 한다. 앞에서 제안한 바와 같이

$$C = \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \end{bmatrix} \quad (40)$$

라고 하면 식(38)로부터

$$\begin{matrix} c_1 B \neq 0 \\ c_2 B = 0, \quad c_2 AB \neq 0 \end{matrix} \quad (41)$$

이 성립되므로

$$B^* = \begin{bmatrix} c_1 B \\ c_2 AB \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 & 0 \\ -8 & 3 \end{bmatrix}, \quad \det(B^*) \neq 0 \quad (42)$$

가 얻어지므로 식(38)의 시스템은 비 간섭조건을 만족시키고 있다.

목표치의 미분이 사용가능하다는 조건을 이용하여

$$\begin{aligned} \tilde{C} &= \begin{bmatrix} \tilde{c}_1 \\ \tilde{c}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1^1 c_1 \\ a_1^2 c_2 + c_2 A \end{bmatrix} \\ \tilde{r} &= \begin{bmatrix} \tilde{r}_1 \\ \tilde{r}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1^1 r_1 \\ a_1^2 r_2 + \dot{r}_2 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (43)$$

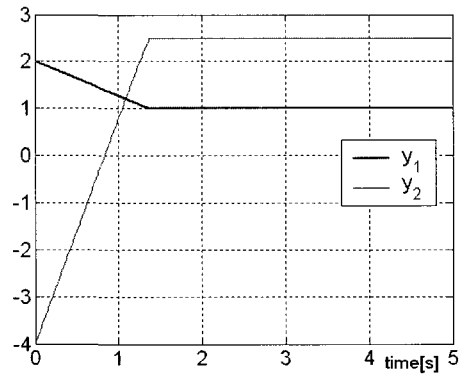
과 같이 정의한다. 단,  $a_i^i > 0 (i=1,2)$ .

스위칭 평면을 식(26)과 같이 정의하면

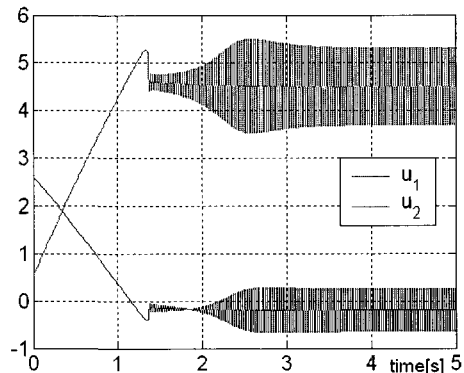
$$\begin{aligned} \alpha(t) &= \tilde{C}x - \tilde{r} \\ &= \begin{bmatrix} a_1^1(c_1 x - r_1) \\ a_1^2(c_2 x - r_2) + (c_2 Ax - \dot{r}_2) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (44)$$

가 되고 식(28)의 제어입력을 적용하면 원하고자 하는 제어목적 달성하게 된다.

목표치를  $\tilde{r} = [1, 2.5]^T$ 로 하고 상태변수의 초기값을  $x_0 = (2, 1, 1)^T$ 로 하였을 때의 시뮬레이션 결과는 Fig. 1 ~ Fig. 3 과 같다.



(a)



(b)

**Fig. 1 Time evolution of outputs and control inputs.**

Fig. 1 (a)는 시스템의 출력 즉,  $y = \tilde{C}x$  를 나타내고 있으며 그림으로부터 목표치  $[1, 2.5]^T$ 에

수렴하고 있음을 알 수 있다. Fig. 1 (b)와 Fig. 2는 각각 제어입력과 슬라이딩 평면을 나타내고 있다. 그림으로부터 도달모드영역( $t=0\sim 1.3ss$ )과 슬라이딩모드영역( $t=1.3\sim 5ss$ )을 구분할 수 있고 제어 출력 값이 슬라이딩평면에 도달한 이후로는 스위칭 입력에 의해서 목표치로 일정하게 유지되고 있음을 알 수 있다.

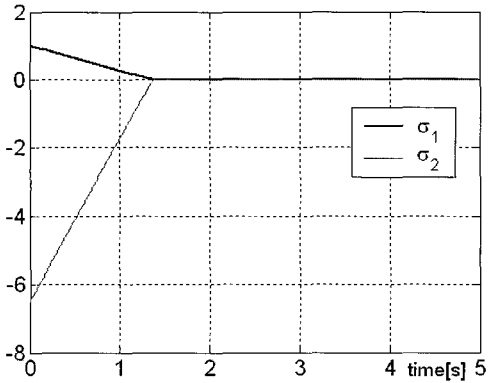


Fig. 2 Time evolution of switching surfaces.

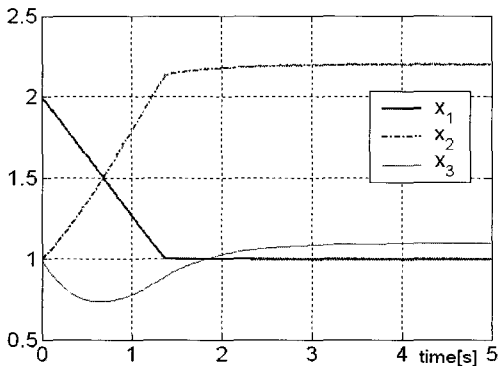
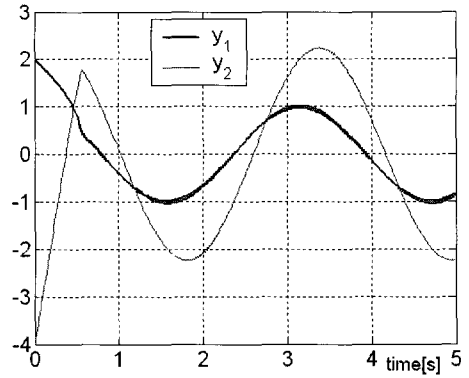


Fig. 3 Time evolution of state variables.

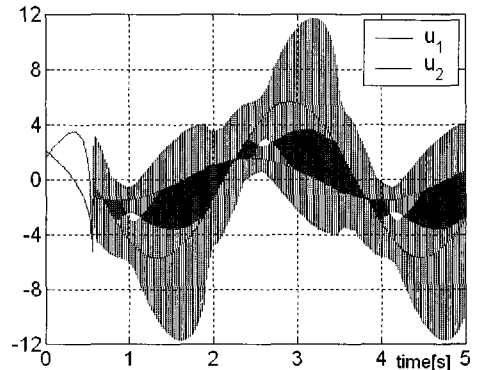
Fig. 3은 상태변수 값의 시간에 따른 변화를 나타내고 있다.

Fig. 4~Fig. 5는 추종 목표치를  $\tilde{r}=[\cos(2t), \sin(2t)+2\cos(2t)]^T$ 로 한 시뮬레이션결과를 나타내고 있다. Fig. 4 (a), Fig. 4 (b)는 각각 시스템의 출력과 제어입력을 나타내고 있으며 Fig. 5는 상태변수의 시간에 따른 변화를 나타내고 있다. 시뮬레이션 결과로부터 원하고자 하는 제어목

적이 달성되고 있음을 알 수 있다.



(a)



(b)

Fig. 4 Time evolution of outputs and control inputs.

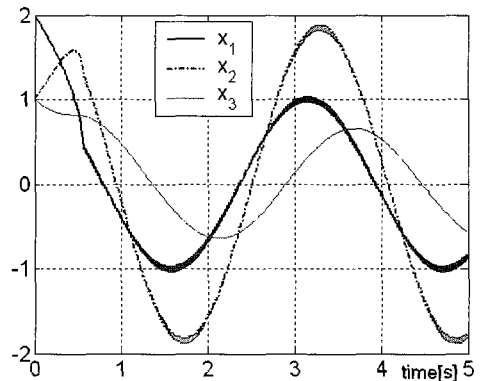


Fig. 5 Time evolution of state variables.

제어계통이 안정되기 위해서는 식(34)로부터  $a_1^i, (i=1,2) > 0$  과  $(C, A, B)$ 의 불변영점이 안정이어야 한다. 식(38)의 시스템은 불변영점을 가지지 않고 있으므로  $a_1^i, (i=1,2) > 0$  에 의해 제어목적 달성된다.

5. 결 론

본 논문에서는  $CB$ 가 정칙인 조건을 만족하지는 않지만  $(C, A, B)$ 가 상태 피드백에 의해 비 간섭화 가능한 조건을 만족하는 경우에 대하여 SMC(sliding mode contro)기법을 적용한 추종제어의 설계방법을 제안하였다. 또한 제안한 설계기법을 추종제어에 적용하여 본 제어방법의 응용성을 확인함과 동시에 수치시뮬레이션을 통하여 제안한 제어기법의 유용성을 검증하였다. 본 논문에서 제안한 제어방법은 슬라이딩모드제어기법의 발전 및 실제 응용에 있어서도 의미가 있다고 생각되어진다.

참고문헌

[1] 野波, “スライディングモード制御”, コロナ社.  
 [2] P. L. Falb, and W. A. Wolovich, “Decoupling in the design and synthesis of multi-variable control systems”, IEEE Trans. on AC, vol. 12, no. 6, pp. 651-659, 1967.  
 [3] E. G. Gilbert, “The Decoupling of multi-variable systems by state feedback”, SIAM J. Control, vol. 7, no. 1, pp. 50-63, 1969.  
 [4] X. U Lu, S. K. Spurgeon, “Robustness of static sliding mode control for non-linear system”, Int. J. Control, vol. 72, no. 15, pp. 1343-1353, 1999.  
 [5] H. Hashimoto et.al, “A Microprocessor-Based robot manipulator control with sliding mode”, IEEE Trans. IE, vol. 34, no.1, pp. 11-18, 1987.  
 [6] Y. S. Chen, H. Ikeda, T. Mita and S. Wakui, “Trajectory control of robot

arm using sliding mode control and experiments”, Journal of robotics society in japan(JRSJ), vol. 7, no. 6, pp. 62-67, 1989.  
 [7] J. J. Slotine and S. S. Sastry, “Tracking control of nonlinear systems using sliding surfaces with application to robot manipulators”, Int. J. Control, vol. 38, no. 2, pp. 465-492, 1983.  
 [8] J. E. Slotine, “The robust control of robot manipulators”, Int. J. Robotics research, vol. 4, pp. 49-63, 1985.  
 [9] 小郷寛, 美多勉, “システム制御理論入門”, 實教出版社.

저 자 소 개



**남택근 (南澤槿)**  
 1990년 한국해양대학교 기관공학과 졸업. 1996년 한국해양대학교 기관공학과 대학원 졸업(공학석사). 2001년 동경공업대학 제어공학과 졸업(공학박사). 2002년~2003년 한국전기연구원 선임연구원. 2003년~현재 목포해양대학교 기관시스템공학부 전임강사.



**박재식 (朴在植)**  
 1987년 한국해양대학교 박용기계공학과 졸업. 1992년 한국해양대학교 기관공학과 대학원 졸업(공학석사). 2000년 고베상선대학 대학원 해양기계/에너지 전공 졸업(공학박사). 2000년~2002년 고베상선대학, 현재 한국해양대학교 강사.



**노영오 (盧永梧)**  
 1973년 한국해양대학교 기관공학과 졸업. 1986년 한국해양대학교 기관공학과 대학원 졸업(공학석사). 1994년 한국해양대학교 기관공학과 대학원 졸업(공학박사). 현재 목포해양대학교 기관시스템공학부 교수.



**안병원 (安秉元)**  
 1986년 한국해양대학교 기관공학과 졸업. 1991년 한국해양대학교 기관공학과 대학원 졸업(공학석사). 1996년 한국해양대학교 기관공학과 대학원 졸업(공학박사). 현재 목포해양대학교 기관시스템공학부 부교수.