

슬라이딩 모드 고유치 설정에 기반을 둔 가변구조 제어 설계

홍연찬¹, 이태봉^{2*}

¹인천대학교 전자공학과, ²경원대학교 전자정보통신학부

Variable Structure Control Design Based on Eigenvalues Assignment of Sliding Mode

Yeon Chan Hong¹ and Tae Bong Lee^{2*}

¹Department of Electronics, Incheon University

²Division of Electronics and Information Communication, Kyungwon University

요약 본 논문에서는 슬라이딩 모드의 고유치를 직접 설정하는 방법을 이용하여 가변구조 제어 시스템을 설계하는 새로운 방법을 다루었다. 기존의 방법에서는 스위칭 평면 설계 시 정규형 이나 표준형과 같은 특별한 형태의 시스템 행렬이 요구되었을 뿐만 아니라 그 방법들이 명시적이 못했다. 본 논문에서는 이러한 문제들을 해결하고자 하였다. 제시된 방법은 특별한 형태의 시스템 행렬을 요구하지 않을 뿐만 아니라 명시적이다. 기존에 밝혀진 시스템 영점과 슬라이딩 모드의 동특성의 관계를 이용하여 시스템 형태와 무관하게 스위칭 평면이 유일하게 결정될 수 있음을 보였다. 마지막으로, 수치 예를 통해 제시된 방법의 타당성을 확인하였다.

Abstract A new scheme for variable structure control design which is based on eigenvalues assignment of sliding mode is developed. In conventional methods, generally, specific type of system matrix like canonical or regular form is required to construct a switching surface. Furthermore, the methods are not explicit. The new method in this paper solved the problems. No special type of system matrix is required and very explicit. It is shown that the switching surface can be constructed and determined uniquely without any dependency on the system form. The proposed method is based on the fact that the dynamics of sliding mode is determined by system zeros. Finally, a numerical example is given to verify the validity of the results studied in this paper.

Key Words : Variable Structure Control, Sliding Mode, System Matrix, Switching Surface, System Zeros

1. 서론

가변구조 제어 시스템은 상태공간 내에 원점을 지나는 평면을 설정하고 입력을 통해 상태궤적이 평면에 도달하여 이 후 평면을 따라 움직이도록 구성된다. 이 때 설정된 평면을 따라 움직이는 시스템 운동을 슬라이딩 모드라 한다. 슬라이딩 모드의 동특성은 설정된 평면에 의해 결정되며 적합조건을 만족하는 외부 외란이나 내부의 모델 불확실성 등에 영향을 받지 않는 매우 강인한 특성을 갖는다[1-3].

한편 가변구조 제어 시스템의 입력은 설정된 평면을

기준으로 스위칭 되는 불연속적인 구조를 갖는다. ‘가변구조’라는 명칭 또한 평면을 경계로 인가되는 서고 다른 두 입력 때문에 붙여진 이름으로 이 때문에 설정된 평면을 스위칭 평면이라고도 한다. 즉, 슬라이딩 모드란 스위칭 평면상에서의 시스템 운동이라 할 수 있다.

가변구조 제어 시스템 구성은 두 단계로 이루어진다. 첫 번째 단계는 제어 시스템 특성을 결정하는 스위칭 평면 혹은 슬라이딩 평면을 설계하는 것이다. 지금까지 이것에 대한 많은 연구가 있었으며[3-9] 그 중 가장 일반적인 방법은 시스템을 표준형(canonical form) 또는 정규 표준형(regular canonical form)으로 변환하여 슬라이딩 모

이 연구는 2009년도 경원대학교 지원에 의한 결과임.

*교신저자 : 이태봉(tblee@kyungwon.ac.kr)

접수일 2010년 04월 06일

수정일 10년 05월 04일

게재확정일 10년 06월 18일

드의 고유치나 고유치 벡터를 지정하는 방법이다. 그러나 이러한 방법은 시스템 변환을 요구할 뿐만 아니라 그 방법이 명시적이지 못하다는 단점을 가지고 있다. 이와 달리 시스템 형태의 변환을 필요로 하지 않는 방법으로는 Lyapunov 함수를 이용한 방법[4]과 LMI(Linear Matrix Inequality)를 이용한 방법[5] 등이 있다. 이와 더불어 Ackermann[6]은 단일 입.출력 시스템을 대상으로 슬라이딩 모드 of 고유치를 명시적으로 결정하는 방법을 제시하였으며 최근 이태봉[8] 등은 다변수 시스템에 적용 가능한 명시적인 고유구조 지정법을 제안하였다.

본 논문에서는 단일 입.출력 시스템을 대상으로 시스템 형태에 무관하게 슬라이딩 모드 고유치를 지정할 수 있는 또 다른 슬라이딩 평면 설계법을 제시하고자 한다. [8]에서는 고유벡터 설정을 통해 평면을 설계한 반면 본 연구는 Ackermann의 방법과 같이 슬라이딩 모드 of 고유치를 직접 지정한다. 따라서 제시된 방법은 Ackermann의 방법과 같이 명시적이면서도 보다 직관적인 방법이다. 이와 더불어 본 논문에서는 종래 제어입력의 단점을 살펴보고 이를 보완하여 상태궤적이 평면으로 접근하는 최소 접근속도를 지정할 수 있는 제어 알고리즘을 적용하여 제어기를 구성하였다.

2. 시스템 표현

다음 식과 같이 표현되는 n 차 선형 시스템에 대하여 고려하도록 하자.

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + Bd(x,t) \quad (1)$$

(1)식에서 $x(t) \in R^n$ 은 시스템의 상태벡터이고 $u(t) \in R^{m \times 1}$ 은 제어입력이며 상수 행렬은 각각 $A \in R^{n \times n}$, $B \in R^{n \times m}$ 이다. $d(x,t) \in R^{m \times 1}$ 은 시스템의 불확실성을 포함한 외란이다. (1)식의 시스템에 대하여 다음을 가정하기로 한다.

- A1. (A, B) 는 가제어성을 갖는다.
- A2. 상태벡터 x 는 유용하다.
- A3. $d(\cdot)$ 는 각 인자에 대해 연속이다.
- A4. $|d(x,t)| < p$ 인 $p > 0$ 가 존재한다.

3. 정칙 시스템과 슬라이딩 모드

(1)식의 시스템에 대해 스위칭 평면을 다음 식과 같이 정의 하자.

$$S(x) = Cx(t), \quad C \in R^{m \times n} \quad (2)$$

그리고 등가제어[2,10]를 적용하면 원점을 지나는 스위칭 평면을 따라 움직이는 슬라이딩 모드는 다음 식으로 표현된다.

$$\dot{x} = [I_n - B(CB)^{-1}C]Ax(t) \equiv A_{eq}x(t) \quad (3a)$$

$$S(x) = Cx = 0 \quad (3b)$$

한편 (1)식과 (2)식의 (A, B, C) 는 정칙 시스템의 일종으로 볼 수 있으며 따라서 다음과 같은 시스템 행렬을 구성할 수 있다[10].

$$P(\lambda) = \begin{bmatrix} \lambda I_n - A & -B \\ C & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

정의된 정칙 시스템의 영점은 (4)식으로부터 다음과 같이 표현 된다.

$$z(\lambda) = \det P(\lambda) = \det(\lambda I - A) \det\{C(\lambda I - A)^{-1}B\} \quad (5)$$

한편 (3)식으로 표현되는 슬라이딩 모드 of 동특성은 다음 식과 같다[11].

$$\begin{aligned} \det(\lambda I_n - A_{eq}) & \\ &= \det(\lambda I_n - A + B(CB)^{-1}CA) \\ &= \det(CB)^{-1} \lambda^m \det(\lambda I_n - A) \det\{C(\lambda I_n - A)^{-1}B\} \end{aligned} \quad (6)$$

(5)식을 이용하면 (6)식은 다음 식과 같이 표현할 수 있다.

$$\det(\lambda I_n - A + B(CB)^{-1}CA) = \det(CB)^{-1} \lambda^m z(\lambda) \quad (7)$$

(7)식은 슬라이딩 모드 동특성이 m 개의 0(zero)인 고유치와 (A, B, C) 로 정의되는 정칙 시스템의 영점, $z(\lambda) = 0$ 에 의해 결정됨을 보여주고 있다. 이러한 사실 관계를 바탕으로 본 논문에서는 $m = 1$ 인 스칼라 시스템을 대상으로 슬라이딩 모드 of 0(zero)이 아닌 고유치를 결정하는 $z(\lambda)$ 가 임의의 값을 갖도록 스위칭 행렬 C 를 결정하는 방법을 제시하고 이를 이용하여 가변구조 제어 시스템을 구성하고자 한다. 다음이 정리는 평면 행렬 C

와 $z(\lambda)$ 와의 관계를 나타내는 정리이다.

정리 1:

$m=1$ 일 때 (3)식에서 스위칭 평면 행렬을

$$C = [\alpha_0 \alpha_1 \alpha_2 \cdots \alpha_{n-1}] \begin{bmatrix} 1 & a_1 & a_2 & a_{n-1} \\ 0 & 1 & a_1 & a_{n-2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \cdot [BAB A^2 B \cdots A^{n-1} B]^{-1} \quad (8)$$

와 같이 결정하면 (7)식의 $z(\lambda)$ 는

$$z(\lambda) = (\alpha_0 \lambda^{n-1} + \alpha_1 \lambda^{n-2} + \cdots + \alpha_{n-1}) \quad (9)$$

이 된다.

증명 :

단일 입.출력 시스템의 경우 (5)식은 다음 식과 같이 표현된다.

$$z(\lambda) = \det(\lambda I - A) \det \{ C(\lambda I - A)^{-1} B \} = CA \text{adj}(\lambda I_n - A) B \quad (10)$$

따라서 (9)식에 대해 다음 등식이 성립한다.

$$z(\lambda) = \alpha_0 \lambda^{n-1} + \alpha_1 \lambda^{n-2} + \cdots + \alpha_{n-1} = CA \text{adj}(\lambda I_n - A) B \quad (11)$$

(11)식에 관계식

$$\text{Adj}(\lambda I_n - A) = \lambda^{n-1} I_n + (A + a_1 I_n) \lambda^{n-2} + \cdots + (A^{n-1} + a_1 A^{n-2} + \cdots + a_{n-1} I_n) \quad (12)$$

단,

$$\det(\lambda I_n - A) = \lambda^n + a_1 \lambda^{n-1} + \cdots + a_{n-1} \lambda + a_n$$

을 대입하면 다음과 같은 등식이 성립한다.

$$\begin{aligned} CB &= \alpha_0 \\ CAB + a_1 CB &= \alpha_1 \\ CA^2 B + a_1 CAB + a_2 CB &= \alpha_2 \\ \vdots &= \vdots \\ CA^{n-1} B + a_1 CA^{n-2} B + \cdots + a_{n-1} CB &= \alpha_{n-1} \end{aligned} \quad (13)$$

(13)식을 행렬을 이용하여 나타내면 다음 식과 같다.

$$C[BABA^2 B \cdots A^{n-1} B] \begin{bmatrix} 1 & a_1 & a_2 & a_{n-1} \\ 0 & 1 & a_1 & a_{n-2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = [\alpha_0 \alpha_1 \alpha_2 \cdots \alpha_{n-1}] \quad (14)$$

따라서 (9)식을 만족하는 스위칭 행렬 C 는 (8)식과 같음을 알 수 있다.

정리는 (8)식을 통해 원하는 고유치를 갖는 스위칭 평면행렬 C 의 결정이 매우 명시적임을 보여 주고 있다.

4. 제어기 구성

가변구조 제어 시스템의 제어 입력은 평면 $S=0$ 에서 슬라이딩 모드를 보장 할 뿐만 아니라 외란과 같은 영향으로 시스템 궤적이 평면을 벗어날 경우 다시 평면에 도달 할 수 있도록 하여야 한다. 이를 위한 입력의 충분 조건은 다음과 같으며 이를 일명 도달조건이라 한다[1,2].

$$S(x) \cdot \dot{S}(x) < 0 \quad (15)$$

즉, 시스템 (1)의 제어입력이 (15)의 조건을 만족하면 (3)식으로 표현되는 슬라이딩 모드를 얻을 수 있다. (15)식의 조건을 (1)식의 시스템에 적용하면 입력 조건은 다음 식과 같다.

$$\begin{cases} u < -\{(CB)^{-1}CAx + d(x,t)\}, & s > 0 \\ u > -\{(CB)^{-1}CAx + d(x,t)\}, & s < 0 \end{cases} \quad (16)$$

(16)식은 (15)의 조건을 만족하는 입력이 $S=0$ 를 경계로 불연속임을 보여주고 있다. (16)식의 조건을 만족하는 가장 일반적인 입력의 형태는 다음 식과 같다.

$$u = -(CB)^{-1}CAx + u_d, \quad u_d = \begin{cases} u_d^+, & \text{if } S(x) > 0 \\ u_d^-, & \text{if } S(x) < 0 \end{cases} \quad (17)$$

(17)식의 입력을 (1)식의 시스템에 인가하여 연속함과 불연속함으로 구성된 입력의 특성에 대해 살펴보기로 하자.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= (I_n - B(CB)^{-1}C)Ax + B(u_d + d(x,t)) \\ &= A_{eq}x + B(u_d + d(x,t)) \end{aligned} \quad (18)$$

(18)식이 슬라이딩 모드를 갖기 위해서는 미정의 불연속 입력, u_d 가 다음의 조건을 만족하여야 하며

$$S \cdot \dot{S} = C(A - B(CB)^{-1}CA)x + CBu_d + CBd(x,t) = S \cdot \{0 + CB(u_d + d(x,t))\} < 0 \quad (19)$$

그러면 시스템은 (3)식으로 표현되는 슬라이딩 모드로 동작한다.

(19)식을 통해 가변구조 제어 시스템의 입력을 (17)식과 같이 정의 하면 불연속 입력항만이 도달조건에 기여함을 알 수 있다. 따라서 견실성이 보장되지 않는 도달구간을 짧게 하기 위해서는 불연속 입력의 크기를 크게 하여야 한다. 그러나 이것은 입력의 고주파 성분인 채터링을 크게 하는 문제가 있다[9]. 본 논문에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 제어입력을 다음 식과 같이 정의 하도록 하고

$$u = u_r + u_d = Kx + u_d, \quad u_d = \begin{cases} u_d^+, & \text{for } S(x) > 0 \\ u_d^-, & \text{for } S(x) < 0 \end{cases} \quad (20)$$

(20)식의 연속입력, $u_r = Kx$ 가 (17)식과 달리 도달구간에서 평면으로 향하는 최소 접근속도를 보장하도록 결정하고자 한다. 이를 위해 (20)식의 입력을 (1)식의 시스템에 인가하고 평면의 변화율을 구하면 다음 식과 같다.

$$\dot{S}(x) = C(A + BK)x + CB(u_d + \rho(x,t)) \quad (21)$$

(21) 식이

$$C(A + BK) = -\gamma C, \quad \gamma > 0 \quad (22)$$

를 만족하면 (20)식의 입력에 대해 다음 식이 성립한다.

$$S \cdot \dot{S} = S(-\gamma Cx) + S \cdot CB(u_d + d(x,t)) = -\gamma S^2 + S \cdot CB(u_d + d(x,t)) \quad (23)$$

따라서 입력 u_d 가 (19)식의 조건을 만족한다면 (23)식은 다음을 만족 한다.

$$S \cdot \dot{S} = -\gamma S^2 + S \cdot CB(u_d + d(x,t)) < -\gamma S^2 \quad (24)$$

(24)식은 (22)식을 통해 연속입력을 결정하게 되면 연속입력이 도달구간에서 상태궤적이 평면에 도달하는 최

소속도를 결정한다는 것을 보여준다. (22)식을 만족하는 연속입력 항 K 는 다음 식과 같다.

$$K = -(CB)^{-1}CA - \gamma(CB)^{-1}C \quad (25)$$

이제 (25)식의 값을 갖는 (20)식이 (15)의 조건을 만족하는 경우 (1)식의 시스템이 (3)식의 슬라이딩 모드를 갖는다는 것을 보이기로 한다. 이를 위해 (20)식과 (25)식을 (1)식의 시스템에 인가하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= (I_n - B(CB)^{-1}C)Ax - \gamma B(CB)^{-1}Cx + B(u_d + d(x,t)) \\ &= A_{eq}x - \gamma B(CB)^{-1}S + B(u_d + d(x,t)) \end{aligned} \quad (26)$$

(26)식은 입력이 (15)의 조건을 만족하므로 $S=0$ 평면에서 (3)식과 같은 것을 알 수 있다.

이제 마지막으로 불연속 입력항의 구성에 대해 살펴보기로 한다. 불연속항을 구성하는 방법은 여러 가지[4]가 있으나 본 논문에서는 다음과 같은 입력을 사용하기로 한다.

$$u_d = -p \operatorname{sgn}(S), \quad \operatorname{sgn}(S) = \begin{cases} +1 & \text{for } S > 0 \\ -1 & \text{for } S < 0 \end{cases} \quad (27)$$

따라서 본 논문에서 사용하는 입력은 다음 식과 같다.

$$u = -(CB)^{-1}(A + \gamma C)x - p \operatorname{sgn}(S) \quad (28)$$

(28)식을 적용하면 도달조건은 다음 식과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} S \cdot \dot{S} &= S(-\gamma S + CB(u_d + d(x,t))) \quad , CB > 0 \\ &= -\gamma S^2 + CB \cdot S(-p \operatorname{sgn}(S) + d(x,t)) \\ &= -\gamma S^2 + CB(-p|S| + Sd(x,t)) < -\gamma S^2 < 0 \end{aligned} \quad (29)$$

주어진 식이 (15)식의 도달조건을 만족하므로 사용된 입력이 슬라이딩 모드를 보장함을 알 수 있다. 한편 (28)식에서 $\gamma=0$ 인 경우 (28)식은 종래의 입력, (17)식과 같음을 알 수 있다.

5. 수치 예

다음 식과 같이 주어진 시스템을 고려하도록 하자[2].

$$A = \begin{bmatrix} -1 & 2 & -7 \\ 2 & 3 & 14 \\ -1 & 2 & 10 \end{bmatrix} \quad (30)$$

$$B^T = [-1 \quad 2 \quad -1]$$

$$d(X,t) = 0.5 \sin(x_1 + x_2 - x_3)$$

주어진 시스템의 특성 다항식은 다음 식과 같으며 두 개의 양의 고유치와 하나의 음의 고유치를 갖는다.

$$\det(\lambda I - A) = \lambda^3 - 125\lambda^2 - 22\lambda + 119 \quad (31)$$

슬라이딩 모드에서 원하는 고유치를 -5 와 -10 이라 하면 이에 대응하는 (11)식의 방정식은 다음과 같다.

$$z(\lambda) = \lambda^2 + 15\lambda + 50 = 0 \quad (32)$$

(30), (31), (32)식 값을 (8)식에 적용하면 평면 행렬은 다음 식과 같이 결정된다.

$$C = [1 \ 15 \ 50] \begin{bmatrix} 1 & -12 & -22 \\ 0 & 1 & -12 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} -1 & 12 & 3 \\ 2 & -10 & -76 \\ -1 & -5 & -82 \end{bmatrix}^{-1} \quad (33)$$

$$= [-0.4202 \ -1.4571 \ -3.4941]$$

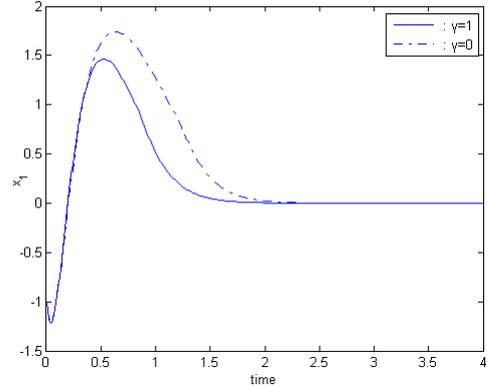
따라서 (33)식으로 구성된 평면상에서 슬라이딩 모드는 다음 식과 같이 주어진다.

$$\dot{x} = (I_n - B(CB)^{-1}C)Ax \quad (34)$$

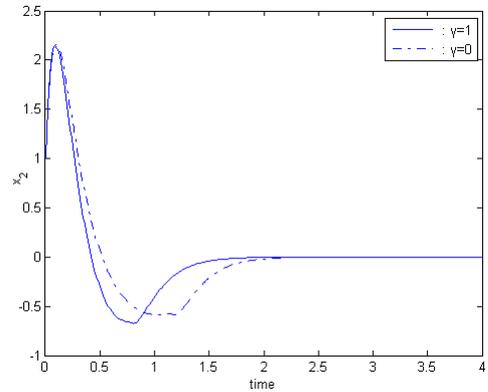
$$= A_{eq}x = \begin{bmatrix} 0 & -10.2 & -59.4 \\ 0 & 27.4 & 118.8 \\ 0 & -10.2 & -42.4 \end{bmatrix} x$$

이 시스템의 고유치는 $\lambda = 0$ 와 $\lambda = -5, -10$ 이 됨을 확인 할 수 있다.

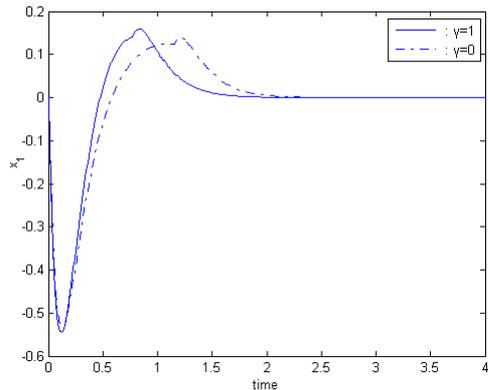
한편 제어입력 구성을 위해 (28)식의 불연속항은 $p = 0.5$ 를 사용하였고 연속항은 $\gamma = 1$ 을 선택하였다. 아울러 종래의 제어입력과 본 논문에서 사용한 제어입력의 성능 차이를 확인하기 위하여 $\gamma = 0$ 을 사용하여 두 결과를 비교하였다. 다음은 그 결과를 나타내는 그림이다. $\gamma = 1$ 인 경우 모든 값이 0으로 보다 빨리 수렴함을 알 수 있다. 특히 그림 4는 본 논문에서 사용한 제어입력이 종래의 제어입력보다 도달 구간을 짧게 하는데 매우 효과적임을 명시적으로 보여주고 있다.



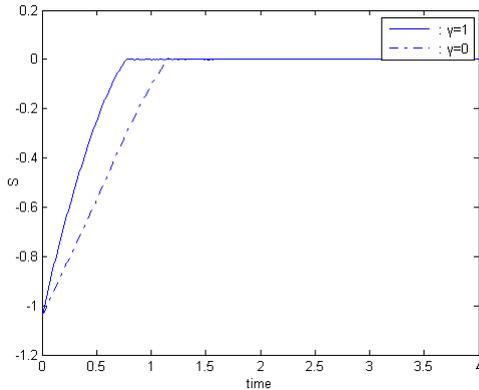
[그림 1] 상태변수 $x_1(t)$



[그림 2] 상태변수 $x_2(t)$



[그림 3] 상태변수 $x_3(t)$



[그림 4] 스위칭평면 $S(x)$

6. 결론

본 논문에서는 주어진 시스템의 시스템 행렬 형태와 무관하게 스위칭 평면을 명시적으로 결정 할 수 있는 새로운 스위칭 평면 설계 방법을 제시 하였다. 제시된 방법을 이용하면 종래의 방법과 달리 스위칭 평면 설계를 위해 시스템을 표준 가제어 형 혹은 정규 형으로 변환 할 필요가 없다. 이와 더불어 명시성이 부족한 종래의 방법과 달리 본 논문에서 제시된 수식을 통해 평면 행렬을 유일하게 결정할 수 있다. 한편 제시된 알고리즘이 적용된 제어기 구성에서는 종래 제어입력의 문제점을 살펴보고 이를 개선하기 위한 제어 알고리즘을 사용하였다. 제시된 방법의 타당성은 수치 예를 수행하여 검증하였다. 앞으로 과제는 본 논문의 알고리즘을 다변수 시스템에 확대 적용하는 것이다.

참고문헌

[1] U. Itkis, *Control System of Variable Structure*, Keter Publishing House Jerusalem Ltd, 1976.
 [2] V. I. Utkin, *Sliding Modes in Control Optimization*, Springer-Verlag, 1992.
 [3] O. M. E. El-Ghezawi, A. S. I. Zinober, and S. A. Billings, "Analysis and design of variable structure systems using geometric approach," *Int. J. Control*, vol. 38, pp. 657-671, 1983.
 [4] W. Su, S. V. Drakunov, and Ü. Özgüner, "Constructing discontinuity surface for variable structure systems: A Lyapunov approach," *Automatica*, vol. 32, pp.

925-928, 1996.

[5] H. H. Choi, "A new method for variable structure control system design: A linear matrix inequality approach," *Automatica*, vol. 33, pp. 2089-2092, 1997.
 [6] J. Ackermann and V. Utkin, "Sliding mode control design based on Ackerman's formula," *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 43, no. 2, pp. 234-237, Feb. 1998.
 [7] C. M. Dorling and A. S. I. Zinober, "Two approaches to hyperplane design in multivariable variable structure systems," *Int. J. Control*, vol. 44, pp. 65-82, 1986.
 [8] 이태봉, 양현석, "고유구조 지정에 의한 슬라이딩 평면 설계와 불확실한 시스템의 슬라이딩 모드 제어," *J. of Institute of Control, Robotics and Systems* Vol. 15, No. 8 pp. 812-817, 2009.
 [9] J. J. Lee and Y. Xu, "A new method of switching surface design for multivariable structure system," *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. 39, pp. 414-419, 1994.
 [10] H. H. Rosenbrock, *State-space and Multivariable Theory*, John Wiley and Sons, 1970
 [11] Stanislaw H. Zak and Stefen Hui "On Variable Structure Output Feedback Controllers for Uncertain Dynamic Systems," *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. 38 pp. 1509-1512, 1993.

이 태 봉(Tae Bong Lee)

[정회원]



- 1986년 2월 : 홍익대학교 전자공학과 졸업.
- 1989년 2월 : 동 대학원 석사.
- 1994년 2월 : 동 대학원 박사.
- 1995년 3월 ~ 현재 : 경원대학교 전자정보통신공학부 교수.

<관심분야>

강인제어, 인공지능제어, GMDH

홍 연 찬(Yeon Chan Hong)

[정회원]



- 1983년 2월 : 서울대학교 전자공학과 졸업.
- 1985년 2월 : 동 대학원 석사.
- 1989년 2월 : 동 대학원 박사.
- 1987년 4월 ~ 1990년 2월 : 금성정보통신(주) 연구소 선임연구원.
- 1990년 3월 ~ 1992년 2월 : 순천향대학교 전자공학과 전임강사.

- 1992년 3월 ~ 현재 : 인천대학교 전자공학과 교수

<관심분야>

GMDH, RFID, 신경망, 제어 시스템 설계