LMI-based Design of Output Feedback Integral Sliding Mode Controllers

최 한 호*
(Han Ho Choi)

Abstract - This paper presents an LMI-based method to design an output feedback integral sliding mode controller for a class of uncertain systems. Using LMIs we derive an existence condition of a sliding surface. And we give a switching feedback control law. Finally, we give a numerical design example in order to show the effectiveness of the proposed method.

Key Words : Linear matrix inequality(LMI), Uncertain system, Integral sliding mode control, Output feedback.

1. 서 론

슬라이딩 모드 제어 이론은 불확실성의 높 크기가 알려진 시스템을 위한 강인한 제환 제어기 설계에 성공적으로 적용되었다[1-6], [10]. 대부분의 슬라이딩 모드 제어기는 슬라이딩 동작이 시작된 후에 원하는 성능을 제공하는데 즉 리칭 모드가 슬라이딩모드 이전에 존재하는데 만약 슬라이딩 모드가 시작부터 존재한다면 리칭모드가 존재하는 일반적인 슬라이딩 모드 제어기보다 더 강인한 특성을 보일 것이다. 최근에 [7], [8] 등에서는 리칭모드가 존재하지 않고 시작시간부터 슬라이딩 모드가 존재하는 적분 슬라이딩 모드 제어기를 설계하는 방법이 제시되었다. 실제의 시스템의 경우에는 모든 상태 정보를 측정하기 어렵거나 비용이 많이 들어 일부의 상태 정보 즉 출력만을 제환에 이용할 수 있다라는 사실을 고려하여 본 논문에서는 [7], [8], [10]의 결과를 확장하여 출력 제한 적분 슬라이딩 모드 제어기 설계법을 제안한다. 먼저 슬라이딩 평면이 존재할 조건을 LMI 형태로 제시하고 스위칭 제환 제어기를 제시한다. 마지막으로 기존 방법을 보조하고 보다 나올 수 있음을 보이기 위해 설계 예를 제시한다.

2. 문제 설정

본 논문에서는 다음과 같은 동역학 방정식으로 표현 가능한 시스템을 다룬다[9].

$$\dot{x} = Ax + B[u + h(t)], \quad y = Cx \quad (1)$$

여기에서 $x(t) \in R^n, u(t) \in R^p, y(t) \in R^q, \rho(t) \in R^m$ 로 각각 상태, 입력, 출력, 외란을 가리키며 다음을 만족시킨다고 가

정한다.

A1: (A, B) 로 안정가능하다.

A2: $\text{rank}(B) = m < p = \text{rank}(C)$

A3: $\|h(t)\| \leq \phi\|u\| + \beta(y, t), \quad 0 \leq \phi < 1$ 을 만족시키는 상수 ϕ 와 양함수 $\beta(y, t)$ 가 알려져 있다.

(2)와 같은 $q \geq m$ 차의 보상기를 도입하고 (4)와 같은 슬라이딩 평면을 정의하고 (5)와 같은 슬라이딩 모드 제어기를 고려하자.

$$\dot{v} = A_K v + B_K y \quad (2)$$

$$\sigma = F_1 y + F_2 v, \quad v(0) = -F_2^T (F_2 F_2^T)^{-1} F_1 y(0) \quad (3)$$

$$u = u_n + u_l, \quad (4)$$

$$u_l = C_K v + D_K y, \quad u_n = -\rho(t) \frac{\sigma}{\|\sigma\|} \quad (5)$$

여기에서 $A_K \in R^{q \times q}, B_K \in R^{q \times p}, C_K \in R^{m \times q}, D_K \in R^{m \times p}, F_1 \in R^{m \times p}, F_2 \in R^{m \times q}$ 는 설계 변수 행렬이고 v 는 보상기 상태이고 $\rho(t)$ 는 불확실성 $h(t)$ 를 소거하기 위해 가해야 할 양함수이다. (3)에서처럼 $v(0)$ 를 결정함으로 인해 $\sigma(0) = 0$ 이 됨에 유의해야 한다. 결국 본 논문에서 다룰 문제는 $A_K, B_K, C_K, D_K, F_1, F_2$ 이 존재할 조건과 LMI 설계알고리즘 그리고 설계변수 $\rho(t)$ 를 결정하기 위한 공식을 제공하는 것으로 환원될 수 있다.

보조정리 1 : 적절한 차원을 갖는 행렬 $E, Y, W > 0$ 에 대하여 다음 부등식이 항상 성립한다.

$$E^T Y + Y^T E \leq E^T W E + Y^T W^{-1} Y$$

3. 주요 결과

확장된 상태 $z = [x^T, v^T]^T$ 를 도입함으로 (1)-(5)의 폐회로 시스템과 σ 는 다음처럼 고쳐 쓰일 수 있다.

$$\dot{z} = (\bar{A} + \bar{B} \bar{K} \bar{C}) z + B_0 [u_n + h(t)] \quad (6)$$

$$\sigma = F z \quad (7)$$

* 정 회 원 : 동국대학교 전기공학과 교수

E-mail : hhchoi@dongguk.edu

접수일자 : 2010년 8월 11일

최종완료 : 2010년 12월 17일

여기에서 $\bar{A}, \bar{B}, K, \bar{C}, B_0, F$ 는 다음처럼 주어진다.

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \bar{B} = \begin{bmatrix} B & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix}, K = \begin{bmatrix} D_K & C_K \\ B_K & A_K \end{bmatrix}, \quad (8)$$

$$B_0 = \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix}, \bar{C} = \begin{bmatrix} C & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix}, F = \begin{bmatrix} F_1^T \\ F_2^T \end{bmatrix}^T$$

정리 1 : 설계변수 A_K, B_K, C_K, D_K 에 대하여 다음 (9)를 만족시키는 해 P 가 존재한다고 가정하고 설계변수 F 가 (10)처럼 주어지고 $\rho(t)$ 가 (11)처럼 주어진다고 하자.

$$P > 0, P(\bar{A} + \bar{B}K\bar{C}) + (\bar{A} + \bar{B}K\bar{C})^T P < 0 \quad (9)$$

$$F\bar{C} = B_0^T P \quad (10)$$

$$\rho(t) = \frac{1}{1-\phi} [\gamma + \phi \|C_K v + D_K y\| + \beta(y, t)] \quad (11)$$

여기에서 γ 는 충분히 큰 양수이다. 그리고 $F_2 F_2^T > 0$ 라고 하자. 그러면 슬라이딩 모드 동역학은 안정하며 슬라이딩 모드는 처음부터 즉 $t=0$ 에서부터 시작된다.

증명 : 리아푸노프 함수를 $L(t) = z^T P z$ 로 하면 이의 도함수는 가정 A3, 보조정리 1, 그리고 (9), (10), (11)식을 이용하여 다음을 만족시킴을 쉽게 보일 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{L} &= 2z^T P[\bar{A} + \bar{B}K\bar{C}]z + 2z^T P B_0 [u_n + h(t)] \\ &\leq 2z^T P[\bar{A} + \bar{B}K\bar{C}]z + 2\|\sigma\|[\phi\|u\| + \beta - \rho] \\ &\leq -z^T Qz + 2\|\sigma\|[\phi\|C_K v + D_K y\| + \phi\rho + \beta - \rho] \\ &\leq -\lambda_{\min}(Q)\|z\|^2 - 2\gamma\|\sigma\| \leq -\lambda_{\min}(Q)\|z\|^2 \leq 0 \end{aligned} \quad (12)$$

여기에서 $-Q = P(\bar{A} + \bar{B}K\bar{C}) + (\bar{A} + \bar{B}K\bar{C})^T P < 0$ 이다. 결국 이는 $z=0$ 이 점근적으로 안정하며 즉 슬라이딩 모드 동역학은 안정하며 $\|z(t)\| \leq \kappa\|z(0)\|$, $\kappa = \sqrt{\lambda_{\max}(P)/\lambda_{\min}(P)}$ 이 성립함을 의미한다. $t=0$ 에서부터 슬라이딩모드가 존재함을 보이기 위해 $\sigma(0) = 0$ 이며 $\sigma^T(B_0^T P B_0)^{-1} \dot{\sigma} < 0$ 이 아닌 σ 에 대하여 성립함을 보이기만 하면 된다[7][10]. (3)은 $\sigma(0) = 0$ 을 의미하므로 $\sigma^T \dot{\sigma} < 0$ 만 보이면 된다. 가정 A3을 이용하여 다음을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \sigma^T(B_0^T P B_0)^{-1} \dot{\sigma} &= \sigma^T(B_0^T P B_0)^{-1} B_0^T P[\bar{A} + \bar{B}K\bar{C}]z + \sigma^T[u_n + h] \\ &\leq \|\sigma\|(\delta\|z\| + \phi\|u\| + \beta - \rho) \\ &\leq -\|\sigma\|(\gamma - \delta\|z\|) \end{aligned}$$

여기에서 $\delta = \|(B_0^T P B_0)^{-1} B_0^T P[\bar{A} + \bar{B}K\bar{C}]\|$ 이다. 결국 양수 γ 가 $\gamma > \delta\kappa\|z(0)\|$ 를 만족할 만큼 충분히 크다면 슬라이딩 모드 동역학은 안정하며 슬라이딩 모드는 $t=0$ 에서부터 시작됨을 알 수 있다. $\nabla \nabla \nabla$

위의 정리1은 해석에는 유용하나 설계에는 직접적으로 유용하지 않다. 다음의 정리가 설계에 사용될 수 있다.

정리 2 : 다음의 LMI를 만족시키는 해 (W, H, Y, L_Y, L_X) 가 존재하면 (9), (10), $F_2 F_2^T > 0$ 를 만족시키는 (P, K, F) 가 존재한다.

$$MAY + BL_Y + * < 0, \quad (13)$$

$$W = W^T, H = H^T, (\Phi W \Phi^T + C^T H C)A + L_X C + * < 0, \quad (14)$$

$$\Pi = \begin{bmatrix} \Phi W \Phi^T + C^T H C & I \\ I & Y \end{bmatrix} \geq 0 \quad (15)$$

$$\begin{bmatrix} B^T C^T H C B & B^T \\ B & Y \end{bmatrix} > 0 \quad (16)$$

여기에서 $*$ 는 행렬의 대칭성에 의해 유추될 수 있는 블록행렬을 의미하고, $\Phi \in R^{n \times (n-m)}$ 는 $\Phi^T \Phi = I$, $\Phi^T B = 0$ 를 만족시키는 행렬이다.

증명 : (13)-(16)의 해 (W, H, Y, L_Y, L_X) 가 존재한다고 가정하자. $X = \Phi W \Phi^T + C^T H C$ 라고 하자. [9]의 Schur complement 공식은 (15)가 $X \geq Y^{-1} > 0$ 을 의미함을 보장한다. (14)는 $(\alpha W, \alpha H, Y, L_Y, \alpha L_X)$, $\alpha > 1$ 도 해가 될 수 있음을 의미한다. $\alpha X > X \geq Y^{-1} > 0$ 이 성립하므로 일반성의 훼손 없이 (W, H, Y, L_Y, L_X) 는 항상 $X - Y^{-1} > 0$ 을 보장한다고 가정할 수 있다. 그러므로 $U U^T = X - Y^{-1} > 0$ 를 만족시키는 비특이 행렬 U 가 항상 존재한다. U 를 이용해 행렬 V 를 $V = -Y U$ 로 정의할 수 있고 R, S 를 다음처럼 정의할 수 있다.

$$R = \begin{bmatrix} Y & I \\ V^T & 0 \end{bmatrix}, S = \begin{bmatrix} I & 0 \\ X & U \end{bmatrix} \quad (17)$$

또한 W, H, Y, L_Y, L_X 과 U, V 를 이용하여 (P, K, F) 를 다음처럼 정의할 수 있다.

$$A_K = -U^{-1}(XAY + A^T + L_X CY + XBL_Y)V^{-T} \quad (18)$$

$$B_K = U^{-1}L_X, C_K = L_Y V^{-T}, D_K = 0$$

$$F_1 = B^T C^T H, F_2 = B^T U \quad (19)$$

$$P = \begin{bmatrix} X & U \\ U^T & I \end{bmatrix} \quad (20)$$

[9]의 Schur complement 공식과 $U U^T = X - Y^{-1} > 0$ 는 $P > 0$ 을 의미한다. (19)와 (20)식에서 다음을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} B_0^T P &= [B^T \ 0] \begin{bmatrix} X & U \\ U^T & I \end{bmatrix} = [B^T X \ B^T U] = [B^T C^T H C \ B^T U] \\ &= [F_1 C \ F_2] = [F_1 \ F_2] \begin{bmatrix} C & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix} = F\bar{C} \end{aligned}$$

즉 $B_0^T P = F\bar{C}$ 가 성립함을 의미한다. 또한 [9]의 Schur complement 공식과 (16), $U U^T = X - Y^{-1} > 0$ 를 이용하여 다음을 보일 수 있다.

$$B^T X B - B^T Y^{-1} B = B^T U U B = F_2 F_2^T > 0$$

결국 (18)-(20)에 정의된 (P, K, F) 가 다음을 만족함을 보이기만 하면 증명은 종결된다.

$$P(\bar{A} + \bar{B}K\bar{C}) + * < 0 \quad (21)$$

$$(21) \text{ 식은 다음과 동치이다.}$$

$$R^T [P(\bar{A} + \bar{B}K\bar{C}) + *] R < 0 \quad (22)$$

$U U^T = X - Y^{-1}$, $V = -Y U$ 를 이용하여 다음을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} R^T P &= \begin{bmatrix} Y & V \\ I & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X & U \\ U^T & I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} YX + VU^T & YU + V \\ X & U \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} Y(X - U U^T) & 0 \\ X & U \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I & 0 \\ X & U \end{bmatrix} = S \end{aligned}$$

즉 $R^T P = S$ 가 성립함을 의미한다. 이는 (21)을 다음처럼 고쳐 쓸 수 있음을 의미한다.

$$S(\bar{A} + \bar{B}K\bar{C})R + * < 0 \quad (23)$$

(17)을 이용하여 다음이 성립함을 알 수 있다.

$$S\bar{A}R = \begin{bmatrix} AY & A \\ XAY & XA \end{bmatrix}, \quad (24)$$

$$S\bar{B}K\bar{C}R = \begin{bmatrix} BL_Y & 0 \\ -XAY - A^T & L_X C \end{bmatrix}$$

(13), (14)와 (24)을 이용하여 다음을 얻을 수 있다.

$$S(\bar{A} + \bar{B}K\bar{C})R + * = \begin{bmatrix} AY + BL_Y + * & 0 \\ 0 & XA + L_X C + * \end{bmatrix} < 0$$

즉 (23)과 그와 동치인 (21)의 성립을 의미한다. 결국 LMI (13)-(16)의 해 (W, H, Y, L_Y, L_X) 가 존재하면 (9), (10), $F_2 F_2^T > 0$ 를 만족시키는 해 (P, K, F) 가 존재함을 알 수 있다. $\nabla \nabla \nabla$

주 1 : [9]의 결과를 이용하면 (13)의 해가 존재할 필요충분조건은 (A, B) 쌍이 안정 가능한 것임을 알 수 있다. [10]의 결과를 이용하면 (14)를 만족시키는 해 $X = \Phi W \Phi^T + C^T H C > 0$ 가 존재하기 위한 필요충분조건은 $C(sI - A)^{-1}B$ 가 최소위상이며 relative degree가 1이라는 것을 의미한다. 그리고 정리 2는 LMI (13)-(16) 만족시키는 해 (W, H, Y, L_Y, L_X) 가 존재하면 (9), (10), $F_2 F_2^T > 0$ 를 만족시키는 해 (P, K, F) 가 존재하고 그 해는 (W, H, Y, L_Y, L_X) 을 사용해서 (18)-(20)처럼 표현될 수 있다는 것을 의미한다. 결국 본 논문의 결과는 다음의 LMI 기반 알고리즘을 통해 출력 재환 적분 슬라이딩 모드 제어를 설계할 수 있음을 의미한다.

[단계1.1] $C(sI - A)^{-1}B$ 가 안정가능이고 최소위상이며 relative degree가 1인지 확인하라. 맞으면 [단계1.2]로 가고 아니면 설계가 불가능하므로 빠져나간다.

[단계1.2] LMI최적화 알고리즘을 사용하여 (13)-(16)의 해 (W, H, Y, L_Y, L_X) 를 구하라. 이때 여러 해들 중에서 $X - Y^{-1} > 0$ 가 되는 해를 선택한다.

[단계1.3] 공식 (18), (19)을 사용하여 이득 K, F 를 구하고 (11)을 사용하여 제어기 (2)-(5)를 구하라.

주 2 : (9)의 조건식은 만약 P 가 주어진다면 K 에 대하여 LMI식이다. 그리고 (13)-(16)은 LMI이다. 그러므로 위의 설계알고리즘 대신 다음처럼 제어이득 $A_K, B_K, C_K, D_K, F_1, F_2$ 을 구할 수도 있다.

[단계2.1] $C(sI - A)^{-1}B$ 가 안정가능이고 최소위상이며 relative degree가 1인지 확인하라. 맞으면 [단계2.2]로 가고 아니면 설계가 불가능하므로 빠져나간다.

[단계2.2] LMI최적화 알고리즘을 사용하여 (13)-(16)의 해 (W, H, Y, L_Y, L_X) 를 구하라.

[단계2.3] 공식 (20)을 사용하여 P 를 결정한다. 그리고 $F = B_0^T P$ 를 이용해 이득 F 를 계산해 낸다.

[단계2.4] 주어진 P 를 가지고 K 에 대하여 LMI인 (21)식을 풀어 K 를 구한다. 그리고 (11)을 사용하여 제어기 (2)-(5)를 구하라.

주 3 : 제어기 (2)-(5)에서는 불연속인 함수 $\sigma/\|\sigma\|$ 가 사용되었는데 이는 [7]에서 지적된 것처럼 채터링을 유발할 수 있다. 이는 일반적으로 시스템에 악영향을 미치므로 보통 불연속인 함수 $\sigma/\|\sigma\|$ 를 $\sigma/(\|\sigma\| + \epsilon)$ 와 같은 연속적인 함수로 대체하여 사용한다. 여기에서 $\epsilon > 0$ 으로 ϵ 의 값이 0으로 접근하면 원래의 제어기 성능에 접근한다. 연속적인 함수로 근사화하면 점근안정성을 보장할 수 없어 원래의 제어기보

다는 성능이 떨어지며 시스템 궤적이 0으로 수렴하는 것을 보장하지 못하고 ϵ 값에 의존하는 영역으로의 수렴만을 보장할 수 있다.

그림 1 시뮬레이션 결과. (위)x. (가운데) σ . (아래)u.

Fig. 1 Simulation results. (Top)x. (Middle) σ . (Bottom)u.

4. 수치적 예

다음 자료를 갖는 시스템 (1)을 고려하자.

$$A = \begin{bmatrix} -0.990 & 17.410 & 96.150 \\ 0.265 & -0.851 & -11.390 \\ 0 & 0 & -30.000 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} -97.780 \\ 0 \\ 30.000 \end{bmatrix},$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad h(t) = \zeta$$

여기에서 ζ 는 불확실한 변수로 $|\zeta| \leq 1$ 를 만족시킨다. 위의 시스템은 [11]에 주어진 F4E 팬텀 전투기의 5000피트에서의 모델에 불확실성이 가미된 동역학 식이다. [7], [8]을 포함하는 이전의 적분 슬라이딩 모드 제어기 설계 방법은 위의 시스템에 적용 불가능함에 유의해야 한다. 이전 섹션에 주어진 알고리즘을 참조하여 다음과 같은 이득을 구할 수 있다.

$$A_K = \begin{bmatrix} -16.305 & 7.040 & 102.854 \\ 2.055 & -0.793 & -13.003 \\ 2.236 & 3.910 & -15.971 \end{bmatrix},$$

$$B_K = \begin{bmatrix} -0.008 & -0.016 \\ -0.015 & -0.025 \\ -0.029 & 0.024 \end{bmatrix}, \quad C_K^T = \begin{bmatrix} -0.001 \\ -0.011 \\ 0.000 \end{bmatrix},$$

$$F_1^T = \begin{bmatrix} -0.698 \\ -2.965 \end{bmatrix}, \quad F_2^T = \begin{bmatrix} -898.322 \\ 1.491 \\ 134.730 \end{bmatrix}$$

$|\zeta| \leq 1$ 는 $\beta(y, t) = 1, \phi = 0, \epsilon = 1$ 로 정할 수 있음을 의미한다. 결국 (5)로부터 다음과 같은 출력 재환 적분 슬라이딩 모드 제어기를 얻을 수 있다.

$$\dot{v} = A_K v + B_K y, \quad v(0) = -F_2^T (F_2 F_2^T)^{-1} F_1 y(0)$$

$$u = C_K v - 2\text{sign}(F_1 y + F_2 v)$$

시뮬레이션을 수행할 때 $\zeta = \sin 10t, x(0) = [0, 0, 1]^T$ 로 가정하였다. 그림 1은 시스템 (25)와 출력 재환 슬라이딩 모드 제어기 (27)의 폐회로 응답을 보여준다. 이전의 슬라이딩 모드 제어기의 시뮬레이션 결과들과 달리 그림 1에서는 리

칭모드가 존재하지 않고 초기시간 $t=0$ 부터 슬라이딩 모드가 존재함을 확인할 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 이전의 결과를 보조하고 대체할 수도 있는 출력 궤환 적분 슬라이딩 모드 제어기 설계법을 제안하였다. 불확실성이 존재하는 시스템을 대상으로 슬라이딩 평면이 존재할 조건을 LMI 형태로 제시하고 스위칭 궤환 제어를 제시하였다. 마지막으로 수치적인 예를 제시하여 효용성을 보였다.

참 고 문 헌

- [1] R.A. DeCarlo, S.H. Zak, and G.P. Mathews, "Variable structure control of nonlinear multivariable systems: A tutorial," IEEE Proceedings, vol. 76, pp. 212-232, 1988
- [2] V.I. Utkin, "Variable structure systems with sliding modes," IEEE Trans. Automat. Contr., vol. 22, pp. 212-222, 1977
- [3] C. Edwards, "A practical method for the design of sliding mode controllers using linear matrix inequalities," Automatica, vol. 40, pp. 1761-1769, 2004
- [4] C. Edwards, A. Akoachere, and S. K. Spurgeon, "Sliding mode output feedback controller design using linear matrix inequalities," IEEE Trans. Automat. Contr., vol. 46, pp. 115-119, 2001.
- [5] 최한호, "크기가 제한된 제어기를 갖는 비정합 불확실성의 가변구조 시스템을 위한 접근 안정 영역 추정" 전기 공학회 논문지, 56권, 3호, pp. 600-603, 2007
- [6] 최한호, "전차수 슬라이딩 모드 관측기를 대체하는 축소차수 관측기의 LMI 기반 설계," 제어로봇시스템학회 논문지, 14권, 3호, pp. 232-235, 2008
- [7] J. Ackermann and V.I. Utkin, "Sliding mode control design based on Ackermann's formula", IEEE Trans. Automat. Contr., vol. 43, no. 2, pp. 234-237, 1998
- [8] H.H. Choi, "LMI-based sliding surface design for integral sliding mode control of mismatched uncertain systems," IEEE Trans. Automat. Contr., vol. 52, no. 4, pp. 736-742, 2007
- [9] S. Boyd, L. El Ghaoui, E. Feron and V. Balakrishnan, Linear Matrix Inequalities in system and Control Theory, Philadelphia, SIAM, 1994.
- [10] H.H. Choi, " Sliding-mode output feedback control design," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 55, no. 11, pp. 4047-4054, 2008
- [11] U. Shaked "An LPD approach to robust H_2 and H_∞ static output-feedback design," IEEE Trans. Automat. Contr., vol. 48, no.5, pp.866-872, 2003

저 자 소 개

최 한 호 (崔 漢 浩)

1966년 8월 25일생. 1988년 서울대학교 제어계측 공학과 졸업. 1994년 한국과학기술원 전기및전자공학과 졸업(공학박). 2003년~현재 동국대학교 교수
Tel : 02-2260-3777
Fax : 02-2275-6013
E-mail : hhchoi@dongguk.edu