

비선형 견실제어 이론 및 적용사례

김동환

서울산업대학교

1. 서론

비선형 시스템에 적용되는 제어기 설계는 시스템의 유형에 따라 다양한 방안들이 시도되고 있다. 일반적으로 비선형 모델에 있어서 불확실성(uncertainty)이 없다면 비교적 수월하게 제어기를 설계할 수 있다. 대표적인 것으로는 feedback linearization technique이며 대개는 asymptotic stability를 보장한다. 그러나 명확히 시스템의 dynamics가 알려진 것은 실제로 드물며 대개는 parameter uncertainty나 model uncertainty가 존재할 수밖에 없다. 이 경우에 sliding mode control이나 Lyapunov 방법에 의한 견실제어 기법, 적응제어 방법 등이 적용되어 오고 있다. 이 경우는 대개 uncertainty와 입력 벡터간에 존재하는 일치성 조건(matching condition)에 의존한다. 그러나 이러한 일치성 조건이 존재하지 않을 경우는 더욱 복잡하게 될 수밖에 없다. 여기서 고려된 제어문제는 다음과 같이 기술된다. 불확실한 변수의 일치성(matching condition)이 없는 시스템(mismatched system, 전반적인 시스템이 해당)에서 견실한 제어기를 설계할 수 있는가? 그러므로 이 문제를 해결하기 위한 연구가 계속 진행되어 오고 있다. 우선, 분리법(decomposition approach)이 연구되었다. 이 방안은 불확실성을 일치성과 불일치성으로 나누어 해석하여 선형 시스템에의 적용을 제시하였고[1] 그 후 비선형 시스템에 적용하는 방법을 제시하였다[2]. 이 경우 제어 시스템은 실용적 안정성(practical stability)을 보장하며 제어 파라미터의 조절로 정성상태 오차를 최소화 할 수도 있다. 둘째로 건설적인 방안(constructive approach)이 제시되었다. 이 방법은 불확실성의 구조적 변수를 일치성 조건을 고려하지 않고 직접 접근한다. 이 방법을 통해 불확실한 선형이나 비선형 시스템에 대한 많은 연구가 진행되어왔다. 선형 시스템에 대해서는 Riccati 방법을 이용하였고[3,4] 제어에 2단계 최적화 설정을 제시한 예도 있다[5]. 비선형 시스템에서는 상태변수 변환법을 제시하여 불일치성을 일치성으로 치환하는 방법을 제시하였다[6]. 또한 삽입제어기(implanted control) 또는 backstepping를 제안하여 불일치한 불확실 변수를 가지는 유연 조인트 로봇시스템에 적용한 견실제어 기법도 있다[7]. 다음으로 feedback linearization technique을 확대하여 불확실한 시스템에 적용한 견실제어

기법이 소개되었다[8]. 이산시스템에 대한 견실제어 알고리즘 역시 제안되었다[9]. 물론 특별한 구조를 가지는 시스템에 한정되어 있고 일반적인 불확실비선형 시스템에 대한 이산 s제어 방식은 계속 연구 중이다.

한편 견실적응제어(robust adaptive control)도 다양하게 소개되어 왔고 이를 통해 parameter 불확실성 및 미지의 동력학(unmodeled dynamics)에 도 적용해오고 있다. 이 경우는 일반적으로 제어시스템의 궁극적 한계(ultimate boundedness)로 결론을 내리며 완전한 점근적 안정성(asymptotic stability)나 지수적 안정성(exponential stability)로 유도하는 데는 한계가 있다. 적응제어의 경우 일반적으로 근사기(approximator) 기준 적응제어가 사용되며 이 근사기를 쉽고 효율적으로 사용하기 위하여 adaptive neural network[10-12] 제어기가 비선형시스템에 적용할 수 있게 Brunovsky 형태로 소개되었고 2차 비선형 시스템에서 미지의 함수를 RBF(Radial Basis Function)의 neural network 형태로 parameterization을 취해 구해진 예도 있다[13]. 그리고 미지의 함수를 fuzzy 제어로 유도한 예도 있다[14-15]. 다음으로 비선형 모델을 Takagi-Sugeno fuzzy 모델로 표현하고 국부적으로 선형모델을 구성한다. 이후 Fuzzy 혼합(blending)으로 전체 시스템에 fuzzy 제어기를 구현하는 방안이 널리 알려져 있다[16].

다음으로 위에서 언급한 비선형 견실제어기에 대해서 4가지 정도 대표적으로 그 제어 알고리즘을 소개한다. mismatched uncertainty에 해당되는 flexible joint manipulator에 적용한 견실제어의 실험 결과를 제시하고 fuzzy 및 neural 방법에 의한 견실제어의 예를 소개한다. 다음으로 backstepping 방법에 의한 제어기 설계의 예를 보여준다.

2. 견실제어기 설계 사례

2.1. 유연 조인트를 갖는 2축 매니퓰레이터의 견실 제어기 설계

n개의 링크가 서로 연결된 구조로 이루어진 매니퓰레이터에서 조인트에는 상대 운동을 하기 위한 동력원으로 모터가 사용되고 있다. 동력 전달계는 탄성체로 이루어져

있기 때문에 언제나 유연(flexible)하다. 유연조인트 매니퓰레이터의 동적 모델은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} D(q_1) & 0 \\ 0 & J \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \ddot{q}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C(q_1, \dot{q}_1) \dot{q}_1 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} G(q_1) \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k(q_1 - q_2) \\ -k(q_1 - q_2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ u \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서 q 는 조인트 위치의 n 차 벡터(vector), $D(q)$ 는 링크 행렬이고 J 는 구동 장치의 관성을 나타내는 상수의 대각선행렬이다. $C(q, \dot{q})\dot{q}$ 는 지구 편향력(Coriolis effect)과 원심력을 나타내고 $G(q)$ 는 중력이다. u 는 구동 장치로부터의 입력을 나타낸다. 위에서 주어지는 모델에는 불확실성이 존재하고 불일치한 불확실성을 가지고 있다. 이는 기존의 견실제어로는 쉽게 해결되지 못하므로 여기에서는 backstepping과 상태변수변환을 사용하여 견실제어기를 설계한다[7].

$$\begin{aligned} X_1 &= q_1, \quad X_2 = \dot{q}_1, \quad X_3 = q_2, \quad X_4 = \dot{q}_2, \\ x_1 &= [X_1^T \ X_2^T]^T, \quad x_2 = [X_3^T \ X_4^T]^T, \quad \text{그리고} \\ x &= [x_1^T \ x_2^T]^T \text{라 하자.} \end{aligned}$$

그러면 다음과 같은 두 가지의 하부 시스템을 만들 수 있다.

$$N_1: \dot{x}_1(t) = f_1(x_1(t), \sigma_1) + B_1(x_1(t), \sigma_1)x_2(t) \quad (2)$$

$$N_2: \dot{x}_2(t) = f_2(x_2(t), \sigma_2) + B_2(\sigma_2)u(t) \quad (3)$$

여기서 $\sigma_1 \in R^{n \times 1}$ 과 $\sigma_2 \in R^{n \times 1}$ 은 N_1 과 N_2 에서 각각 불확실 매개변수 벡터이다. 우선 $\varepsilon_1 > 0$ 에 대해 주입(implanted)된 제어 u_1 을 다음과 같이 찾을 수 있다.

$$\begin{aligned} u_1(t) &= \bar{K}^{-1}(-K_{p1}q_1(t) - K_{v1}\dot{q}_1(t) + \\ &+ p_1(x_1(t), \rho_1(x_1(t)), \varepsilon_1)) - \bar{K}^{-1}\beta(\dot{q}_1(t) + S_1q_1(t)), \quad (4) \end{aligned}$$

여기서,

$$\begin{aligned} K_{p1} &:= diag[k_{p1i}]_{n \times n}, \quad k_{p1i} > 0, \\ K_{v1} &:= diag[k_{v1i}]_{n \times n}, \quad k_{v1i} > 0, \\ \mu_1(x_1) &= (\dot{q}_1 + S_1q_1)\rho_1(x_1), \\ \mu_1 &= [\mu_{11} \ \mu_{12} \ \cdots \ \mu_{1n}]^T, \\ P_1 &= [p_{11} \ p_{12} \ \cdots \ p_{1n}]^T, \end{aligned} \quad (5)$$

p_{1i} 는 다음과 같이 주어진다.

$$p_{1i} = \begin{cases} -\frac{\mu_{1i}(x_1)}{\|\mu_{1i}(x_1)\|} \rho_1(x_1), & \text{if } \|\mu_{1i}(x_1)\| > \varepsilon_1 \\ -\sin \frac{\pi \mu_{1i}(x_1)}{2\varepsilon_1} \rho_1(x_1), & \text{if } \|\mu_{1i}(x_1)\| \leq \varepsilon_1 \end{cases}, \quad (6)$$

$i = 1, 2, \dots, n$. 이면

$$p_{1i} = \begin{cases} \leq -\frac{\mu_{1i}(x_1)}{\varepsilon_1} \rho_1(x_1), & \text{if } 0 \leq \mu_{1i}(x_1) \leq \varepsilon_1 \\ \geq -\frac{\mu_{1i}(x_1)}{\varepsilon_1} \rho_1(x_1), & \text{if } -\varepsilon_1 \leq \mu_{1i}(x_1) \leq 0 \end{cases}. \quad (7)$$

이고, $\|p_{1i}\| \leq \rho_1$ 이다.

다음으로 상태변환을 통하여 최종제어기 u 를 설계하는 과정을 기술한다.

먼저 $z_1 = [Z_1^T \ Z_2^T]^T$, $z_2 = [Z_3^T \ Z_4^T]^T$, 그리고

$z = [z_1^T \ z_2^T]^T$ 라고 놓자. 여기서

$$\begin{aligned} Z_1 &:= q_1, \\ Z_2 &:= \dot{q}_1, \\ Z_3 &:= q_2 - u_1, \\ Z_4 &:= \dot{q}_2 - \dot{u}_1. \end{aligned} \quad (8)$$

변환된 시스템의 동적모델은 다음과 같다.

$$\hat{N}: D(Z_1)\hat{Z}_1 = -C(Z_1\hat{Z}_1)\hat{Z}_1 - G(Z_1) - KZ_1 + KZ_3 + Ku_1 \quad (9)$$

$$\hat{N}: J\hat{Z}_3 = -Ju_1 - KZ_3 + KZ_1 - Ku_1 + u \quad (10)$$

한계함수 $\rho_2(\cdot)$ 를 선정하고

$$\rho_2(x_1, Z_3, Z_4) \geq \|\phi_2(x_1, Z_3, Z_4, \sigma_1, \sigma_2)\|. \quad (11)$$

여기서,

$$\begin{aligned} \phi_2(x_1, Z_3, Z_4, \sigma_1, \sigma_2) &= -J(\sigma_2)\ddot{u}_1(X_1, Z_3, Z_4, \sigma_1, \sigma_2) \\ &- K(\sigma_2)Z_3 + K(\sigma_2)Z_1 - K(\sigma_2)u_1(x_1) + J(\sigma_2)S_2\dot{Z}_3 \end{aligned} \quad (12)$$

주어진 $\varepsilon_2 > 0$ 에 대해서 다음과 같은 제어 입력 u 를 선택한다.

$$u(t) = -K_{p2}Z_3(t) - K_{v2}\dot{Z}_3(t) + p_2(x_1(t), Z_3(t), Z_4(t), \varepsilon_2) \quad (13)$$

여기서,

$$p_2(x_1, Z_3, Z_4, \varepsilon_2) = \begin{cases} -\frac{\mu_2(z_1, z_2)}{\|\mu_2(z_1, z_2)\|} \rho_2(x_1, Z_3, Z_4), & \text{if } \|\mu_2(z_1, z_2)\| > \varepsilon_2 \\ -\frac{\mu_2(z_1, z_2)}{\varepsilon_2} \rho_2(x_1, Z_3, Z_4), & \text{if } \|\mu_2(z_1, z_2)\| \leq \varepsilon_2 \end{cases},$$

$$\mu_2(z_1, z_2) = (\dot{Z}_3 + S_2Z_3)\rho_2(x_1, Z_3, Z_4)$$

$$\begin{aligned} K_{p2} &:= diag[k_{p2i}]_{n \times n}, \quad k_{p2i} > 0, \\ K_{v2} &:= diag[k_{v2i}]_{n \times n}, \quad k_{v2i} > 0, \end{aligned} \quad (14)$$

이다. 위와 같은 방법으로 유연조인트를 가지는 로봇



시스템에 대한 견실제어기를 설계하였고 (Fig.1) 이를 실험적으로 검증한 결과를 Fig.2-3에 예시하였다. Fig.2-3에서 알 수 있듯이 조인트의 강성이 유연할 경우 PID에 의한 제어보다 견실제어가 우수한 성능을 보여줄 수 있다. 물론 조인트가 강체이면 PID로도 상당한 성능을 가짐을 이미 알고 있으나 조인트 강성이 적을 경우는 PID로는 한계가 있을 수밖에 없다.

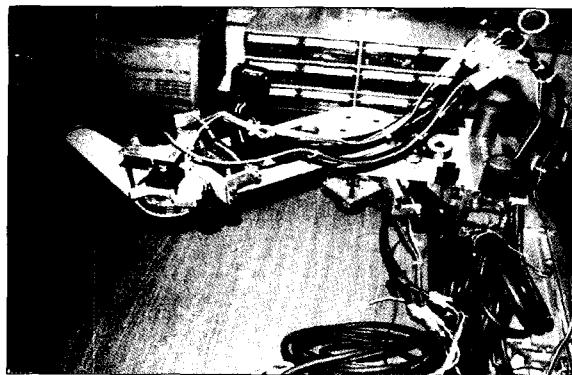


Fig. 1. Experimental equipment of flexible joints system

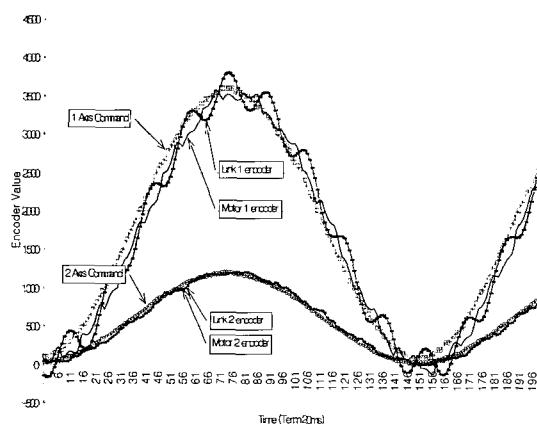


Fig. 2. Response history of motor and link angles with close loop control(soft torsion case, period : 3sec)

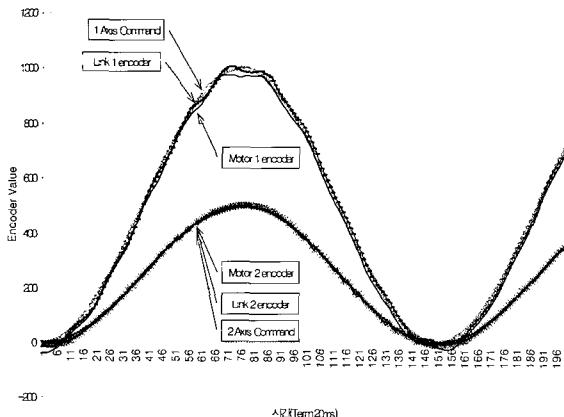


Fig. 3. Response history of motor and link angles with robust control(soft torsion case, period : 3sec)

2.2. 견실적용 neural 및 fuzzy 제어

견실적용 뉴럴제어를 SISO에 대해 적용한 사례이다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_i &= g_i x_{i+1} + f_i(\bar{x}_i) + \Delta_i(t, x), i=1, \dots, n-1 \\ \dot{x}_n &= g_n \beta(x) u + f_n(x) + \Delta_n(t, x) \\ y &= x_1 \end{aligned} \quad (15)$$

여기서

$x = [x_1, \dots, x_n]^T \in R^n$, $\bar{x}_i = [x_1, \dots, x_i]^T$, $u \in R$ 은 제어기이며, f_1, \dots, f_n 은 불확실한 부드러운 함수이다. $\beta(x) : R^n \rightarrow R$ 은 알려진 부드러운 함수이다. 보통의 경우 $g_i = 1$ 경우는 여러 논문에서 제어방안이 기술되어 있으며 g_i 가 알려져 있지 않은 경우는 다음과 같은 제어기가 설계된다.

$$u = \frac{N(\xi_n)}{\beta(x)} (z_n + \hat{W}_{a,n}^T \psi_{a,n} + \hat{b}_n \bar{\phi} \tanh \frac{z_n \bar{\phi}_n}{\varepsilon_n}) \quad (16)$$

상세 내용은 [17]을 참조할 수 있다.

다음으로 Fuzzy 제어를 통한 불확실한 시스템의 견실한 제어기 설계의 예이다[16]. 우선 시스템이 다음과 같이 규정되어 있다고 하자.

$$\dot{x}(t) = A(p(t))x(t) + B(p(t))\sigma(u(t)) \quad (17)$$

여기서

$$\begin{aligned} A(p(t)) &= \sum_{i=1}^r p_i(t) A_i, \\ B(p(t)) &= \sum_{i=1}^r p_i(t) B_i \\ p_i(t) &= p_i(z(t)) = \frac{w_i(z(t))}{\sum_{j=1}^r w_j(z(t))} \\ w_i(z(t)) &= \prod_{j=1}^p M_j(z_j(t)) \end{aligned} \quad (18)$$

제어 rule : If $z_i(t)$ is M_{i1} and ... $z_q(t)$ is M_{q1}

$$\text{Then } u(t) = \sum_{i=1}^r p_i(z(t)) F_i x(t)$$

2.3. 이산 시스템의 견실제어

이산 시스템에 대해서는 다음과 같은 모델에 대해 적용 한다[9].

$$\begin{aligned} x(k+1) &= [A + \Delta A(\sigma(k))]x(k) \\ &+ Bu(k) + Ev(\sigma(k)), x(k_0) = x_0 \end{aligned} \quad (19)$$

여기서 $v(\sigma(k)) \in R^p$ 는 외란이며 $\sigma(k) \in R^s$ 와 $\Delta A(\sigma)$ 는 불확실한 파라메터이다.

이 시스템에 적합한 제어기는 다음과 같은 형태를 취한다.

$$u(k) = Kx(k) + p(x(k)) \quad (20)$$

$$\begin{aligned} p(x) &= -\frac{B^T P \bar{A}}{\|B^T P \bar{A}\|} \quad \text{if } x \notin N(B^T P \bar{A}) = 0 \quad \text{if} \\ x &\in N(B^T P \bar{A}) \end{aligned} \quad (21)$$

$$p(x) = -\frac{B^T P \bar{A}}{\|B^T P \bar{A}\|}$$

여기서 $N(B^T P \bar{A})$ 는 null space를 나타낸다.

2.4. Backstepping에 의한 제어기 설계

Backstepping 방법을 이용하여 입력 불확실성을 가지는 비선형 시스템에 적용하여 견실제어기 설계를 수행한 사례를 소개한다[18]. 이것은 앞서 제시한 유연 조인트 시스템에 적용한 방법과 유사성을 가지지만 SISO 시스템이고 각 상태변수에 불확실성이 존재하지 않고 최종 상태변수의 모델에 나타난다는 가정 하에 설계되었다. 대신에 이 경우는 GAS(Global Asymptotically Stable)을 보장한다는 면에서는 유용성이 있다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \Phi(x) + \Gamma(x)v \\ \dot{\xi} &= q(\xi, u) \\ v &= p(\xi, u) \end{aligned} \quad (22)$$

여기서 u 는 입력이며 v 는 출력으로 불확실성을 가지고 있다. backstepping은 각 subsystem에서 설계한 제어기(가상제어기:virtual control)를 다음 상태변수 와의 차이를 새로운 상태변수로 지정하여 이를 통한 동적 모델에 제어기를 설계하는 방식이다. 상기 시스템의 경우 첫째 subsystem에 부합하는 제어기를 우선 다음과 같이 설계한다.

$$\begin{aligned} \alpha_1^0(X, x_1) &= \frac{1}{g_1(X, x_1)} [-k_1 y_1 - f_1(X, x_1) \\ &\quad + \lambda(X, y_1)] \end{aligned} \quad (24)$$

여기서 $y_1 = x_1$ 으로 설정한다. 이 subsystem 제어기는 subsystem 1을 GAS하게 한다. 다음으로 가상 제어기를 subsystem 2에 적용하기 위해 다음과 같이 설계한다.

$$\alpha_1(X, x_1) = \alpha_1^0(X, x_1) - \eta_1 g_1(X, x_1) y_1 \quad (24)$$

그리고 다른 상태변수 $y_2 = x_2 - \alpha_1(X, x_1)$ 를 지정하여 Lyapunov function의 변화율을 음(<0)이 되게 설계 한다. 이러한 방법으로 기지의 시스템(nominal system)에 대해 우선 제어기를 다음과 같은 형태로 구성된다.

$$\begin{aligned} u &= 1/g_n(X, x) [-k_n y_n - f_n(X, x) + \\ &\quad \alpha_{n-1}(X, y_1, \dots, y_{n-1}) - \lambda g_{n-1}(X, \dots, x_{n-1}) y_{n-1}] \end{aligned} \quad (25)$$

최종적으로 불확실성을 가지는 시스템에 대해서는 다음과 같은 제어기를 가진다.

$$u = \frac{-k}{\mu_n} \theta(V_n) g_n(X, x) y_n, k \geq \frac{1}{\delta} \quad (26)$$

3. 결론

비선형이며 불확실성을 가지는 시스템에 적용되는 다양한 제어기를 소개하였다. 여기서는 시스템을 선형화하지 않고 완전한 모델에 대해 직접 적용해 폐회로 시스템을 안정화시키는 제어기를 소개하였다. 여기에 적합한 방법은 대개 Lyapunov 방법에 의한 것이 대부분이며 제어기 구성과정에 다양한 수학적 기법이 도입된다. 견실제어, 적응견실제어, 견실 궤환선형화, backstepping 방법 등이 여기에 해당된다. 그리고 견실적응제어에서 approximator를 효과적으로 구성하기 위해 fuzzy 및 neural 제어 기법이 사용된다. 비선형 견실제어기 설계에서 완전한 모델을 대상으로 완벽한 제어기의 설계에 대한 지속적인 연구가 수행되고 있으나, 지금까지 소개된 것은 일부 특수한 모델에 효과적으로 적용되는 것이 대부분이다. 또한 제어기의 보전성(conservativeness)에 대해 논의되고 있는 바 입력의 한계(saturation)를 극복하는 견실제어기의 설계 역시 시도되고 있다. 비선형 견실제어기의 실험적 검증을 위해 유연 조인트 로봇에 대해 검증한 결과 우수한 제어성을 가짐을 알 수 있었다. 차후 전개되는 제어의 방향에서는 상태변수 모두를 feedback 하지 않고 일부 상태변수만으로도 제어 성능을 낼 수 있는 새로운 유형의 제어기의 출현을 기대하고 있다. 이를 위해서는 견실 관측기와 제어기의 통합적인 제어 방법과 GA(Genetic algorithm)을 연결하는 방법, 그리고 사람의 지적정보를 최대한 이용하는 방식들이 연구되어야 할 것이다. 또한 설계된 제어기를 보다 다양한 시스템에 적용하여 비선형제어가 우수한 제어 성능을 가짐을 실험적으로 엄밀하게 검증할 필요도 대두된다.

참고문헌

1. B. R. Barmish and G. Leitmann, "On ultimate boundedness control of uncertain systems in the absence of matching condition," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 27, pp. 153-157, 1982.

2. Y. H. Chen and G. Leitmann, "Robustness of uncertain systems in the absence of matching assumptions," *International Journal of Control.*, vol. 45, pp. 1527-1542, 1987.
3. I. R. Petersen and C. V. Hollot, "A Riccati equation approach to the stabilization of uncertain linear systems," *Automatica*, vol. 22, pp. 397-411, 1986.
4. W. E. Schmitendorf, "Designing stabilizing controllers for uncertain systems using the Riccati equation approach," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 33, pp. 376-379, 1987.
5. K. Gu, Y. H. Chen, M. A. Zhody, and N. K. Loh, "Quadratic stabilizability of uncertain systems: a two level optimization setup," *Automatica*, vol. 27, pp. 161-165, 1991.
6. S. N. Singh and A. A. R. Coelho, "Ultimate boundedness control of set points of mismatched uncertain systems," *International Journal of Systems Science*, vol. 14, pp. 693-710, 1983.
7. D. H. Kim, W. H. Oho, and Y. H. Chen, "Robust control design for flexible joint manipulators," submitted to the *International Journal of Control.*, 2003.
8. J. S. Chen and Y. H. Chen, "Robust control of nonlinear uncertain systems: a feedback linearization approach," *Proceedings of the 30th IEEE Conference on Decision and Control*, pp. 2515-2520, 1991.
9. Y. H. Chen, "Partial Compensation for Uncertain Discrete Systems," *Dynamics and Control*, vol. 10, pp. 47-61, 2000.
10. S. S. Ge, T. H. Hang, and T. Zhang, "A Direct Method for Robust Adaptive Nonlinear Control with Guaranteed transient Performance," *System Control Letter*, vol. 37, pp. 275-284, 1999.
11. M. M. Polycarpou, "Stable Adaptive Neural Control System for Nonlinear Systems," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 41, pp. 447-451, 1996.
12. J. T. Spooner and K. M. Passino, "Stable Adaptive Control Using Fuzzy Systems and Neural Networks," *IEEE Transactions on Fuzzy Sets*, vol. 4, pp. 339-359, 1996.
13. A. Yesildirek and F. L. Lewis, "Feedback Linearization Using Neural Networks," *Automatica*, vol. 31, pp. 1659-1664, 1995.
14. G. Feng, "An Approach to Adaptive Control of Fuzzy Dynamic Systems," *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 10, pp. 268-275, 2002.
15. M. C. M. Teixeria and S. H. Zak, "Stabilizing Controller Design for Uncertain Nonlinear Systems Using Fuzzy Models," *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 7, pp. 133-142, 1999.
16. Y. Y. Cao and Z. Lin, "Robust stability Analysis and Fuzzy-Scheduling Control for Nonlinear Systems Subject to Actuator Saturation," *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 11, no.1, pp. 57-67, 2003.
17. S. S. Ge and J. Wang, "Robust adaptive Neural Control for a Class of Perturbed Strict Feedback Nonlinear Systems," *IEEE Transactions on Neural Networks*, vol. 13, no. 6, pp. 1409-1419, 2002.
18. M. Arcak, M. Seron, J. Braslavsky, and P. Kokotovic, "Robustification of Backstepping Against Input Unmodeled Dynamics," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 45, no.7, pp. 1358-1363, 2000.

저자소개



《김동환》

- 1986년 서울대학교 기계설계학과 졸업 (공학사).
- 1988년 서울대학교 기계설계학과 졸업 (공학석사).
- 1995년 Georgia Institute of Technology 기계공학과(Ph.D.).
- 1995. 12~1997. 3 : 서울대학교 공학연구소 특별연구원.
- 1997. 3~1998. 3 : 한국생산기술연구원 선임연구원.
- 1998. 4~현재 : 서울산업대학교 기계설계·자동화공학부 조교수
- 주요관심분야 : 비선형제어이론, 로보틱스, 메카트로닉스, 나노제어시스템.