볼빔 시스템에 대한 입자 군집 최적화를 이용한 최적 퍼지 직렬형 제어기 설계

論 文
57-12-30

Design of Optimized Fuzzy Cascade controller Based on Partical Swarm Optimization for Ball & Beam System

張 漢 鍾* · 吳 聖 權†
(Han-Jong Jang · Sung-Kwun Oh)

Abstract - In this study, we introduce the design methodology of an optimized fuzzy cascade controller with the aid of particle swarm optimization(PSO) for ball & beam system. The ball & beam system consists of servo motor, beam and ball, and remains mutually connected in line in itself. The ball & beam system determines the position of ball through the control of a servo motor.

We introduce the fuzzy cascade controller scheme which consists of the outer(1st) controller and the inner(2nd) controller as two cascaded fuzzy controllers, and auto-tune the control parameters(scaling facrors) of each fuzzy controller using PSO.

For a detailed comparative analysis from the viewpoint of the performance results and the design methodology, the proposed method for the ball & beam system which is realized by the fuzzy cascade controller based on PSO, is presented in comparison with the conventional PD cascade controller based on serial genetic alogritms.

Key Words : Fuzzy cascade controller, PD cascade controller, Particle Swarm Optimization, Ball & Beam System

1. 서 론

기존의 많은 연구에서 볼빔 시스템에 대한 연구는 많이 이루어지고 있다. 본 논문에서는 대중적으로 많이 이용되고 있는 볼빔 시스템을 이용하여 지능형 제어기인 퍼지 제어기[1,2]를 설계하여 최적의 성능을 보이는 것을 목적으로 한다.

볼빔 시스템은 모터와 빔이 직접 연결되어 모터의 제어를 통하여 볼의 위치를 제어하는 시스템으로써 물건 반송 로봇의 운반체 균형 문제, 2 자유도 구륜 이동 로봇, 우주 항공 분야의 비행체 자세 제어 시스템 등과 같은 불안정한 시스템의 안정화와 관련한 다양한 문제에 응용이 가능하다[3-7].

볼빔 시스템의 제어구조는 상태방정식을 이용한 LQR 또는 LQG 제어기, 신경회로망 제어기와 PD 직렬형 제어기 등이 제시되었다. 그 중 PD 직렬형 제어기는 두 형태의 내부와 외부 제어기로 구성된다. 내부 제어기는 모터의 위치 제어에 사용되고 외부 제어기는 볼의 위치변화에 따른 내부 제어기의 설정치(목표값)를 변화시키는 역할을 한다. 그러나 볼빔 시스템의 비선형 특성으로 인하여 볼 위치의 급격한 변화에 대하여 빠른 응답을 얻기가 어렵기 때문에 제어가 용이하지 않다. 그러므로 최적의 제어를 수행하기 위하여 견실한 제어기가 필요하다.

퍼지 제어는 불확정적이고 명확하지 않는 비선형 시스템을 위한 유용한 제어 테크닉 중 하나이다. 퍼지 제어기의 제어 활동은 몇 개의 언어적인 규칙에 의해서 설계 되어진다. 이러한 특성은 제어 알고리즘에 이해를 보다 쉽게 만든다. 퍼지 제어기의 장점은 비선형 시스템들과 설정값이 높은 편차들에 대한 적응능력으로서 증명된다[8,9]. 본 논문에서는 퍼지 제어를 기반으로 하여 볼빔 시스템의 제어기를 위해 퍼지 직렬형 제어기 구조를 제안한다. 제안 구조에서 외부 퍼지 제어기는 비선형적으로 급격하게 변화하는 볼의 위치에 대응하여 내부 퍼지제어기의 설정치를 효율적으로 결정한다. 따라서, 내부 퍼지 제어기는 안정적이고 빠른 응답을 얻을 수 있다. 5장의 실험 부분에서 기존의 PD 직렬형 제어기의 성능과 제안된 퍼지 직렬형 제어기의 성능을 비교하며 두 제어기의 견실성에 대하여 언급한다.

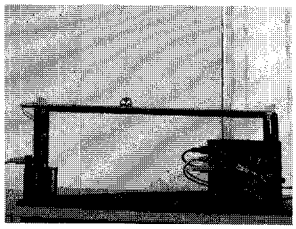
복잡한 시스템 제어에서, 퍼지 제어기 설계의 어려움은 언어적 제어 규칙, 환산계수(scaling factor)와 멤버쉽 함수와 같은 최적 제어 파라미터를 유도하는 것이다. 최적의 제어 파라미터는 퍼지제어기의 성능을 크게 좌우한다[9]. 본 연구에서는 정보 입자 군집 최적화(PSO; Particle Swarm Optimization)[10]와 유전자 알고리즘을 이용하여 설계된 퍼지 직렬형 제어기의 최적화를 실시한다. 이에 따른 PSO알고리즘의 성능과 유전자 알고리즘의 성능을 비교하고 실 시스템에 대한 적용 가능성에 대하여 언급한다.

2. 볼빔 시스템의 입출력 모델

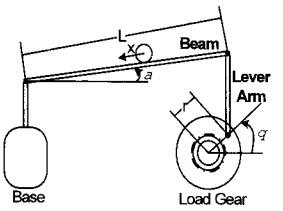
볼빔 시스템의 간략한 모델 구성은 그림 1과 같다.

시스템의 제어 목적은 모터의 전압을 인가하여 볼의 위치를 조정하는 것이다. 볼은 불안정한 상태에서 빔의 각도(α)와 모터의 움직임에 따라 안정한 상태를 유지할 수 있다.

† 교신저자, 正會員 : 수원대학교 전기공학과 교수
E-mail : ohsk@suwon.ac.kr
* 學生會員 : 수원대학교 전기공학과 석사과정
接受日字 : 2008年 8月 7日
最終完了 : 2008年 11月 4日



(a) Practical Ball & Beam system



(b) Mathematical illustration of Ball & Beam

그림 1 볼빔 시스템의 전체 구조
Fig. 1 Overall framework of Ball & Beam system

금속 볼의 위치는 빔의 니크롬선의 저항으로 측정이 되고, 모터의 각(θ)은 엔코더로 측정이 된다. 볼빔 시스템은 빔의 마찰계수와 볼의 속도, 가속도에 대해 제어가 용이하지 않다. 왜냐하면 볼빔 시스템은 각 제어대상의 변화에 따라 서로 영향을 미치기 때문이다.

첫 번째로, Ball과 Beam에 대한 전달함수이다. 위 시스템에는 크게 2가지 힘이 작용한다. x방향의 중력(F_{tx})과 Ball의 회전력(F_{rx})이 존재하게 된다. x방향의 중력은 식(1), Ball의 회전력은 식(2)로 표현된다.

$$F_{tx} = mgsin\alpha \tag{1}$$

$$F_{rx} = \frac{2}{5}m\ddot{x} \tag{2}$$

여기서, m은 볼의 질량, g는 중력가속도, $\ddot{x}$는 볼의 가속도이다.

식(1)과 식(2)에서 주어진 총 움직이는 Ball의 힘(total dynamic force of rolling ball)은 뉴턴의 제2법칙에 의하여 식(3)과 같다.

$$m\ddot{x} = \sum F = F_{tx} - F_{rx} = mgsin\alpha - \frac{2}{5}m\ddot{x} \tag{3}$$

식(3)을 다시 정리하면 식(4)와 같다.

$$\ddot{x} = \frac{5}{7}gsin\alpha \tag{4}$$

식(4)을 로 선형화한 전달함수 형식으로 쓰면 식(5)가 된다.

$$\frac{X(s)}{\alpha(s)} = \frac{5g}{7s^2} \tag{5}$$

두 번째로, 모터의 전압(V_m)으로부터 나오는 출력인 각(θ)에 대한 전달함수는 식 (6)이다.

$$\frac{\theta(s)}{V_m(s)} = \frac{\eta_g\eta_m K_t K_g}{J_{eq}R_m + (B_{eq}R_m + \eta_g\eta_m K_m K_t K_g^2)s} \tag{6}$$

여기서, η_g는 기어박스의 효율, η_m은 모터의 효율, K_t는 모토 토크상수와 K_g는 SRV02 시스템의 기어 비율이다. 그리고 J_{eq}는 로드에 대한 관성 모멘텀, R_m는 회로저항, B_{eq}는 제동효율과 K_m은 역 기전력 상수이다.

마지막으로, Lever arm이 이루는 각(θ)과 이에 연결된 Beam의 각(α)와의 관계는 식 (7)과 같다.

$$\theta r = Arc = \alpha L \tag{7}$$

식(7)을 정리하면 식(8)과 같다.

$$\theta = \frac{L}{r}\alpha \tag{8}$$

식(8)을 전달함수 형식으로 쓰면 식(9)와 같다.

$$\frac{\alpha(s)}{\theta(s)} = \frac{r}{L} \tag{9}$$

이론적으로, Ball & Beam 시스템의 개방 루프 전달함수는 다음과 같다.

$$\frac{X(s)}{V_m(s)} = \frac{\theta(s)}{V_m(s)}\frac{\alpha(s)}{\theta(s)}\frac{X(s)}{\alpha(s)} \tag{10}$$

3. 퍼지 직렬형 제어구조

기존의 PD 직렬형 제어기는 그림 2와 같다. 모터와 빔이 서로 영향을 주는 특수한 시스템에 대하여 직렬형 형식의 제어기를 사용한다. 직렬형 형식의 제어기는 외란을 잘 소거시키고 제어 루프의 동특성 성능을 개선시킨다. 직렬로 연결된 직렬형 시스템은 내부의 제어과정에 설정치가 변화되면 전체적인 시스템에 큰 영향을 준다. 이러한 변화에 쉽게 대응하고 보상하기 위하여 견실한 제어기로서 퍼지 직렬형 제어기가 제안된다.

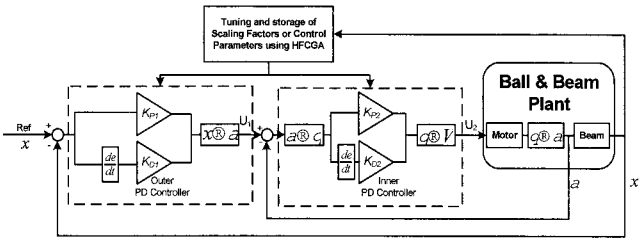


그림 2 PD 직렬형 제어기 구조
Fig. 2 PD cascade controller architecture

Fig. 2의 기본 PD 직렬형 제어기에서, 식 (5)와 (6)을 이용하여 각 루프의 보상된 시스템의 전방향 경로 전달함수는 다음과 같다.

$$G_1(s) = K_{p1} + K_{d1}s \tag{11}$$

$$G_2(s) = K_{p2} + K_{d2}s \tag{12}$$

여기서, 각 파라메터의 설명은 표 2에 나타난다.

식 (11)과 (12)에 대하여 공정에 인가되는 내부 제어루프와 외부 제어루프의 제어신호는 아래와 같다.

$$U_1(t) = K_{p1}E_1(t) + K_{d1}\frac{dE_1(t)}{dt} \tag{13}$$

$$U_2(t) = K_{p2}E_2(t) + K_{d2}\frac{dE_2(t)}{dt} \tag{14}$$

여기서, K_{pi}는 외부 제어루프의 비례이득과 내부 제어루프의 비례이득(i=1, 2), K_{di}는 외부 제어루프의 미분이득과 내부 제어루프의 미분이득, E_i는 외부 제어루프의 오차와 내부 제어루프의 오차이다.

볼빔 시스템의 제어요소들은 상호 영향을 미치는 모델이다. 그리하여 두 개의 PD 제어기를 직렬로 연결한 PD 직렬형 제어기를 설계한다. 외부 루프의 제어기는 주 제어기가 된다. 주 제어루프에서는 볼의 위치를 제어한다. 내부 제어루프는 주 제어루프의 출력을 설정치로 받아 모터를 제어한

다. 이것은 모터 제어의 민감도를 줄일 수 있다. 또한 모터의 레버 암에 위치(θ)가 변하여 빔의 각(α)을 조절한다. 빔의 각(α)의 변화에 따라 볼의 위치를 제어할 수 있다. 그러나 PD 제어기는 운전 중에 시스템의 파라미터가 변동하거나 동작 영역이 변할 때 제어기의 파라미터인 비례이득과 미분이득의 최적의 값을 찾기 어렵다. 특히 센서 노이즈, 외란, 부하변동 등 외부 환경이 변하는 경우 만족할 만한 제어 성능을 얻을 수 없다. 또한 정밀제어를 요하는 시스템에서는 정상상태 오차가 크기 때문에 적용하기가 곤란하다.

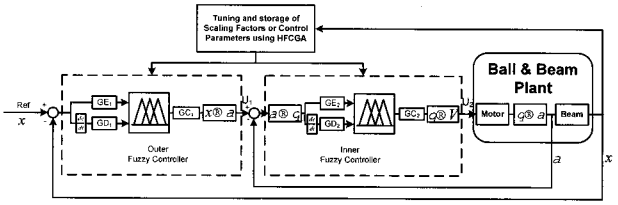


그림 3 퍼지 직렬형 제어기 구조
Fig. 3 Fuzzy cascade controller architecture

이러한 PD 직렬형 제어기의 문제점을 해결하기 위하여 단일 퍼지 제어기 두개를 결합한 직렬형 형태인 그림 3과 같은 퍼지 직렬형 제어기 구조를 제안한다. 퍼지 제어기는 복잡하고 비선형성이 강한 시스템을 퍼지 집합으로 분할하고 각 영역에 따른 규칙 베이스를 구성하여 기존의 제어기보다 훨씬 좋은 성능을 나타내며, 시스템의 동적 특성이 시변(time varing)일 경우 제어기 자체가 시스템의 응답에 대응하므로 기존의 제어기보다 비선형-시변 시스템의 제어가 쉽게 이루어 질 수 있다.

볼빔 시스템을 총괄적으로 제어하는 외부 부분의 퍼지 제어기는 입력인 볼의 위치를 받아서 퍼지 추론에 의하여 정확하고 빠르게 볼의 위치를 제어하게 된다. 퍼지 제어기에 사용한 규칙은 아래와 같다.

$$R^k : E_i \ is \ A_1^k \text{ and } \Delta E_i \ is \ A_2^k \ then \ U_i = B^k \quad (15)$$

여기서, R^k는 k 번째의 제어규칙(k=1, 2, … , m), E_i는 외부 제어루프의 오차와 내부 제어루프의 오차(i=1, 2), $\triangle E_i$는 외부 제어루프의 오차의 변화량과 내부 제어루프의 오차의 변화량이다. A_1^k, A_2^k는 퍼지 변수, U_i는 외부 제어루프의 출력과 내부 제어루프의 출력이며 B^k는 제어기 수행의 상수 변수(singleton)이다.

각 규칙의 전반부 적합도는 식 (16), (17)에 따라 결정되며, 후반부 추론 결과 값은 식 (18), (19)에 의해 나타난다.

외부 제어루프의 전반부 적합도

$$w_{1k} = min\{\mu_{A_1^k}(E), \mu_{A_2^k}(\Delta E)\} \quad (16)$$

내부 제어루프의 전반부 적합도

$$w_{2k} = min\{\mu_{A_1^k}(E), \mu_{A_2^k}(\Delta E)\} \quad (17)$$

외부 제어루프의 후반부 추론 결과 값

$$U_1^* = \frac{\sum_{k=1}^{m} w_{1k} B^k}{\sum_{k=1}^{m} w_{1k}} \quad (18)$$

내부 제어루프의 후반부 추론 결과 값

$$U_2^* = \frac{\sum_{k=1}^{m} w_{2k} B^k}{\sum_{k=1}^{m} w_{2k}} \quad (19)$$

후반부 추론 결과 값에 의하여 각 루프의 제어기 출력 값은 다음과 같다.

최종적인 외부 제어루프의 출력

$$U_1(t) = U_1^*(t) Gc_1 \quad (20)$$

최종적인 내부 제어루프의 출력

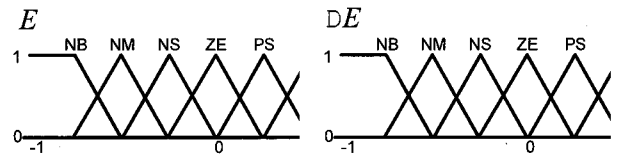
$$U_2(t) = U_2^*(t) Gc_2 \quad (21)$$

퍼지 제어기에 사용한 퍼지제어기의 Rule-Base는 표 1과 같다.

표 1 퍼지제어기의 Rule-Base
Table 1 Rule-Base of fuzzy controller

		E						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
ΔE	NB	NB	NB	NB	NB	NM	NS	ZO
	NM	NB	NB	NB	NM	NS	ZO	PS
	NS	NB	NB	NM	NS	ZO	PS	PM
	ZO	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
	PS	NM	NS	ZO	PS	PM	PB	PB
	PM	NS	ZO	PS	PM	PB	PB	PB
	PB	ZO	PS	PM	PB	PB	PB	PB

표 1과 같은 Rule-Base와 그림 4, 5와 같이 삼각형 멤버쉽 함수(Membership Function)와 간략 추론방식을 이용하여 입력과 출력 공간을 정의한다. 여기서 입력과 출력 공간은 [-1, 1]로 정규화 하였다.



(a) 입력 E의 MF (b) 입력 ΔE의 MF

그림 4 각 입력에 대한 Membership Functions
Fig. 4 Membership functions of the premise input variables

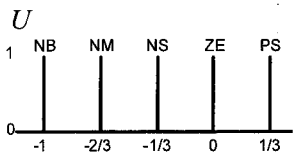


그림 5 출력에 대한 Membership Function
Fig. 5 Membership function defined in the consequence variable, U

외부 루프에 있는 퍼지 제어기의 출력이 내부 퍼지 제어기의 설정치가 된다. 내부의 퍼지 제어기는 외부 루프의 출력을 설정치로 받아 볼빔 시스템의 모터를 제어한다. 퍼지

제어기는 모터위치를 제어 하여 레버 암의 각인 θ를 정확한 위치로 제어한다. 이에 따라 빔의 기울기인 α가 변하게 되어 볼은 원하는 위치로 이동된다. 퍼지 직렬형 제어기에서 주의할 점은 내부의 루프가 급변하게 되면 비선형성이 강한 외부의 제어가 힘들어지게 된다. 따라서, 볼빔 시스템은 내부 루프와 외부 루프에 정확하고 안정적인 제어가 필요하다. 하지만, 서론에서 언급했듯이 견실한 성능을 가진 퍼지 제어기는 최적의 파라미터 및 환산계수를 구하는 것은 쉽지 않다. 그러므로, 파라미터와 환산계수는 다음장에 나오는 최적화 이론인 PSO 알고리즘을 이용하여 튜닝을 한다.

4. 입자 군집 최적화(Particle Swarm Optimization; PSO)

1995년 Kennedy와 Eberhart에 의해 처음 소개된 PSO는 연속의 비선형 함수의 최적화를 위한 방법으로 소개되었다. 이 방법은 간략화된 사회 모델과 생체 군집의 행동양식을 배경으로 한 최적화 알고리즘이다[11]. PSO는 이론이 간결하여 알고리즘을 구현하기 쉽고 연산의 효율성이 뛰어나다. 따라서 적은 세대안에 최적의 해로 수렴하고, 다른 학습 알고리즘에 비해 안정적이다.

기존의 최적화 알고리즘과 비교하여 일반적인 PSO의 장점은 다음과 같다.

(a) PSO는 집단을 기본으로 한 탐색 알고리즘이다. 즉, PSO는 병렬적 진화를 내포한다. 이러한 특성 때문에 다른 탐색 알고리즘들의 문제점인 지역 최소점 최소화 할수 있다.

(b) PSO는 탐색 공간안에 안내 정보(성능지수 또는 목적함수 등)를 사용한다. 따라서 PSO는 미분가능하지 않은 목적함수를 쉽게 다룰 수 있다.

(c) PSO는 확률론적 최적화 알고리즘의 한 종류로서 복잡하고 불확정적인 공간을 탐색할 수 있다. 이것은 PSO를 기존의 방법에 비해 더욱더 유연하고 견실하게 만든다.

(d) GA와 다른 학습 알고리즘과 다르게, PSO는 탐색공간에서 지역탐색과 전역탐색 사이의 균형을 조정하기 위한 유연성을 지닌다. 이러한 PSO의 독특한 기능은 초기 수렴 문제를 극복하고 탐색능력을 높일 수 있다.

(e) 기존의 방법과 다르게, 초기값의 영향에 따른 최적해의 변화가 적다. 탐색 공간안의 어느곳에서 시작하여도 PSO 알고리즘은 최적의 해로 수렴하게 된다.

PSO 알고리즘을 위한 벡터들과 연산자는 다음과 같이 설명한다.

- Particle - x(t): n차원 실수 벡터로 표현된 후보 해.
  $x(t)=[x_{j1}(t), x_{j2}(t),\cdots,x_{jn}(t)]$
- Swarm - S(t): m개의 particle 집합.
  $S(t)=[x1(t), x2(t),\cdots,xm(t)]T$
- Particle best - pbest(t): 현재 위치정보에 대한 최적의 particle.
- Global best - gbest(t): 모든 pbest(t) 중 가장 최적의 위치 정보를 나타내는 particle.
- Particle velocity - v(t): PSO의 연산자. 즉, particle들의 이동속도를 나타낸다.

$$v(t)=[v_{j1}(t), v_{j2}(t),\cdots,v_{jn}(t)]$$
$$v_{jk}(t+1)=w(t)\cdot v_{jk}(t) + c_1\cdot r_1\cdot(pbest_{jk}(t)-x_{jk}(t))+c_2\cdot r_2\cdot(gbest_k(t)-x_{jk}(t)) \quad (22)$$

여기서, w는 관성하중(inertia weight), c1, c2는 가속상수(acceleration constant), r1, r2는 [0 1]의 랜덤상수이다.

- Inertia weight - w(t): 현재 v(t)상에 이전 v(t)의 영향을 조절하는 제어 파라미터.

$$w(t)=w_{\max}-\frac{w_{\max}-w_{\min}}{iter_{\max}}\times t \quad (23)$$

- Acceleration constant - c1, c2: 각 particle이 pbest와 gbest로 향하는 확률적인 가속의 가중치 표현
- Maximum velocity - vmax: Particle velocity의 최대값. Particle velocity는 Swarm 파열과 발산의 위험성을 내포하고 있으며, 해 공간의 지역적 탐색을 강화하기 위하여 vmax를 설정한다.

$$v_k^{\max}=\frac{x_k^{\max}-x_k^{\min}}{N} \quad (24)$$

여기서, N은 k변수에 대한 탐색 간격 수이다.

- Stopping criteria: 종료조건.

PSO 알고리즘의 순서는 6단계로 나누어진다.

[Step 1] *Initialization* - 랜덤하게 m개의 particle들을 탐색공간내에 생성한다. m개의 particle들은 초기 swarm이 된다. 또한, 초기 particle velocity를 $[-v_{\max}, v_{\max}]$에서 임의로 선택한다. 초기 swarm의 각 particle은 목적함수를 이용하여 평가되고, 이들 모두는 *pbset*로 설정한다. 초기 particle 최적의 값은 다시 *gbest*로 선정된다.

[Step 2] *Inertia weight & velocity updating* - 관성하중값을 계산하고, (22)를 이용하여 j번째 particle velocity를 계산한다. 제한조건 $[-v_{\max}, v_{\max}]$을 확인한다.

[Step 3] *Position updating* - 식 (25)에 의해 particle의 위치정보는 조절된다.

$$x_{jk}(t)=v_{jk}(t)+x_{jk}(t-1) \quad (25)$$

여기서, $x_k^{\min}\le x_{jk}(t)\le x_k^{\min}$이다.

[Step 4] *Individual & global best updating* - 새로운 위치정보를 가진 particle들은 목적함수에 의해 평가된다. 각 particle의 적합도는 이전 *pbest*의 적합도와 비교되며 *pbest*를 재설정한다. *pbest*의 particle 중 최적 해를 가지는 particle의 적합도와 이전 *gbest*의 적합도를 비교하여 최적 위치정보를 가진 particle을 *gbest*로 재설정한다.

[Step 5] *Stopping criteria* - 종료조건을 만족하면 탐색 과정을 종료하고, 그렇지 않으면 [Step 2]부터 반복한다.

[Step 6] *Optimal parameter* - 최종적으로 생성된 gbest는 최적의 위치정보를 가진다.

기존의 PD 제어기의 파라미터 조정법에는 Ziegler-Nichols가 제안한 한계감도법, 과도응답법, Hrone-Reswick 방식, Cohen-Coon 방식과 Suyama의 자동 동조 기법 등이 있다[12-17]. 이러한 방법들은 최적의 유사한 파라미터를 찾아주지만 실제 비선형 모델에 적용하기에는 무리가 있다. 따라서, 기존의 PD 제어기의 파라미터 동조는 최적화 알고리즘인 PSO 알고리즘을 이용한다. 퍼지 제어기는 비선형 모델에 강하고 안정성이 뛰어나지만, 파라미터 동정 과정은

계속적인 연구가 진행되고 있으며, 뚜렷한 기법이나 방식들이 나타나지 않고 전문가의 경험에 의하여 파라미터들이 동정들이 되고 있다. 이에 퍼지 제어기의 파라미터 동정도 PSO 알고리즘을 이용하여 최적의 파라미터를 찾는다.

본 논문에서는 정상상태의 오차를 최소로 하기 위하여 목적함수 IAE(Integral of the Absolute value of Error)를 사용한다.

$$IAE = \int |e(t)|dt \tag{26}$$

제어기의 파라미터 동정은 제어기 설계에 가장 핵심적인 부분의 하나로서 정확하고 안정적인 제어를 할 수 있도록 최적의 파라미터를 찾아야 한다. PSO 알고리즘은 다차원인 제어기 파라미터들을 지역해에 수렴하지 않고 최적의 파라미터를 찾아낸다.

5. 실험 및 결과고찰

본 논문에서는 직렬 유전자 알고리즘과 PSO 알고리즘을 이용하여 퍼지 직렬형 제어기와 PD 직렬형 제어기의 최적의 파라미터를 찾아내고 두 종류의 제어기를 비교하여 그 성능을 평가한다. 또한 시뮬레이션으로 최적 설계된 제어기들을 Quanser사의 실제 플랜트인 볼빔 시스템에 적용한다.

볼빔 시스템의 모델은 식 10에서 나타내었다. 표 2는 볼빔 시스템에 대한 파라미터 변수들을 나타낸다.

표 2 Ball & Beam 파라미터 변수

Table 2 Parameter variables for Ball & Beam

Symbol	Description	Value
K_t	Motor torque constant	0.00767
K_m	Back-emf constant	0.00767
K_g	SRV02 system gear ratio	70
R_m	Armature resistance	2.6
J_{eq}	Equivalent moment of inertia at the load	2.0e-3
B_{eq}	Equivalent viscous damping coefficient	4.0e-3
r	Lever arm offset(inch)	1
L	Beam Length(inch)	16.75
g	Earth's gravitational constant(m/s2)	9.8
η_g	Gearbox efficiency	0.9
η_m	Motor efficiency	0.36
m	Mass of the Ball(kg)	0.064
F_{tx}	Translational force on the Ball	
F_{rx}	Rotational force on the Ball	
x	Ball Position	
α	Beam pitch	
θ	Servo load gear angle	
V_m	Motor Input voltage	

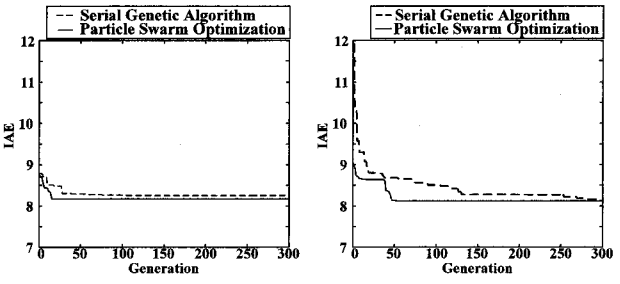
최적의 제어기의 설계를 위하여 제안된 퍼지 직렬형 제어기의 최적의 파라미터를 찾는다. 기존의 직렬 유전자 알고리즘과 PSO 알고리즘의 주요 파라미터와 연산자는 표 3에 나타낸다.

직렬 유전자 알고리즘과 PSO 알고리즘의 세대수는 동일한 300세대로 설정한다. 직렬 유전자 알고리즘의 집단의 크기와 PSO 알고리즘의 각각의 집단의 크기와 paticle 수를 150으로 동일한 환경을 설정한다. 동일한 환경에서 직렬 유전자 알고리즘과 PSO의 성능을 비교한다. 직렬 유전자 알고리즘의 교배율은 0.65, 돌연변이율은 0.1로 놓는다. 연산자는 선형 순위 선택, 수정된 단순 교배 알고리즘, 균일 돌연변이 알고리즘을 사용하고 엘리트전략을 사용하여 최고의 개체를 마지막 세대까지 유지시킨다. PSO의 최대 particle 벡터인 v_{max}는 탐색공간의 20%로 설정하고, 가속상수(c_1, c_2)는 각각 2.0을 주어 목적지를 지나치거나 갑작스런 방향전환을 줄인다. 또한, 최대 0.9에서 최소 0.4까지의 관성하중(w)을 주어 particle의 전역탐색 능력과 지역탐색 능력을 조절한다. 두 종류의 최적화 알고리즘의 성능은 각각의 연산자에 의해서 결정이 되며 그림 6과 같은 특징을 지닌다.

표 3 직렬 유전자 알고리즘과 PSO 알고리즘의 파라미터 및 연산자 요약

Table 3 Summary of the parameters and operators of the serial and PSO algorithms

	Serial Genetic Algorithm		Particle Swarm Optimization	
Parameter	세대수	300	세대수	300
	집단크기	150	Particle 수	150
	교배율	0.65	v_{max}	탐색공간의 20%
	돌연변이율	0.1	c_1, c_2	각 2.0
			$[w_{min}\ w_{max}]$	[0.4 0.9]
Operator	선택연산자	선형 순위 선택		
	교배연산자	수정된 단순 교배		
	돌연변이연산자	균일 돌연변이		
	엘리트전략	사용		



(a) IAE(PD cascade controller) (b) IAE(Fuzzy cascade controller)

그림 6 각 제어기의 세대별 IAE

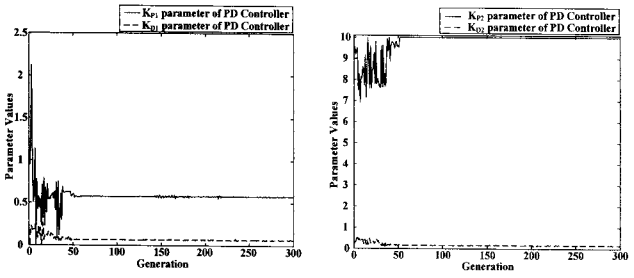
Fig. 6 IAE of each generation from PD and fuzzy cascade controllers

표 4 PD 직렬형 제어기와 퍼지 직렬형 제어기의 성능지수의 값(IAE)

Table 4 The value of performance index(IAE) of PD and fuzzy cascade controller individually

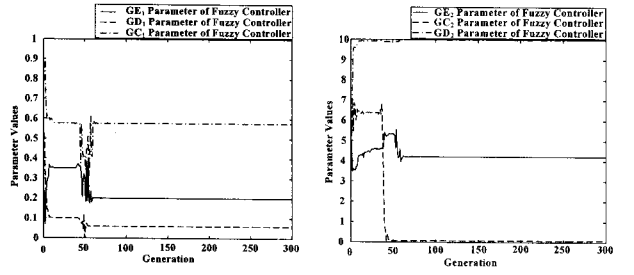
	PD 직렬형 IAE	퍼지 직렬형 IAE
Serial Genetic Algorithm	8.2521	8.1857
Particle Swarm Optimization	8.2066	8.0865

그림 6은 직렬 유전자 알고리즘과 PSO 알고리즘의 세대별 증가에 의한 IAE값을 나타낸다. 그림 6에서 나타나듯이 비교적 제어 설계가 쉬운 기존의 PD 직렬형 제어기는 30세대 이전에 최적의 파라미터를 찾지만 퍼지 직렬형 제어기보다 IAE 값이 약간 높은 것으로 나타난다. 또한 퍼지 직렬형 제어기에서의 세대별 IAE를 보면, 약 50세대까지 빠르게 수렴해 가는 모습을 볼 수 있다. 제안된 퍼지 직렬형 제어기가 기존의 PD 직렬형 제어기보다 견실성에서 우수하다고 말할 수 있다. PSO는 직렬 유전자 알고리즘에 비해 적은 세대 안에서 빠르게 최적의 해를 찾아낸다. 그림 6과 표 4에서 나타나듯이 두 개의 제어기에서 보여주듯이 PSO 알고리즘은 기존의 직렬 유전자 알고리즘보다 빠른 수렴 속도와 오차가 적은 IAE값을 가져 좋은 성능을 보인다. 표 4는 목적함수 IAE가 최소가 되는 값이다. 결론적으로 직렬 유전자 알고리즘보다 PSO가 우수한 성능을 보이기 때문에 다음의 두 제어기 성능을 비교시 PSO 알고리즘을 사용한다.



(a-1) In case of outer loop (a-2) In case of inner loop

(a) PD 제어기의 세대별 파라미터 추정치



(b-1) In case of outer loop (b-2) In case of inner loop

(b) 퍼지 제어기의 세대별 파라미터 추정치

그림 7 PD 제어기와 퍼지 제어기의 세대별 파라미터 추정치

Fig. 7 Parameter values of each generation from PD and fuzzy cascade controller

표 5 PD 직렬형 제어기와 퍼지 직렬형 제어 파라미터

Table 5 Control parameters of PD and fuzzy cascade controller

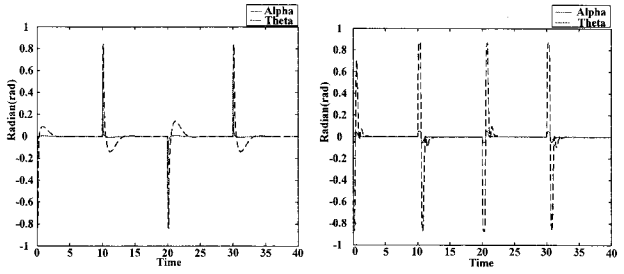
(a) PD cascade controller

PD 직렬형 제어기 파라미터	
K_{p1}	0.5838
K_{d1}	0.0672
K_{p2}	9.9979
K_{d2}	0.1609

(b) Fuzzy cascade controller

퍼지 직렬형 제어기 파라미터	
GE_1	0.1996
GD_1	0.0589
GC_1	0.5758
GE_2	4.2163
GD_2	0.0015
GC_2	9.9895

그림 7은 PSO 알고리즘을 이용하여 최적의 파라미터를 찾는 과정을 세대별로 나타내고 있다. 각각의 제어기 파라미터들은 50세대를 지나면서 최적의 파라미터를 찾아내고 있다. 표 5는 PD 직렬형 제어기의 파라미터(K_{p1}, K_{d1}, K_{p2}, K_{d2})와 퍼지 직렬형 제어기의 파라미터(GE_1, GD_1, GC_1, GE_2, GD_2, GC_2)를 나타낸다. PD 직렬형 제어기는 4차원의 해를 찾아내고, 퍼지 직렬형 제어기는 6차원의 해를 찾아낸다. 이것은 고차원의 문제에서도 최적의 해를 찾아 낼 수 있다는 사실을 나타낸다.

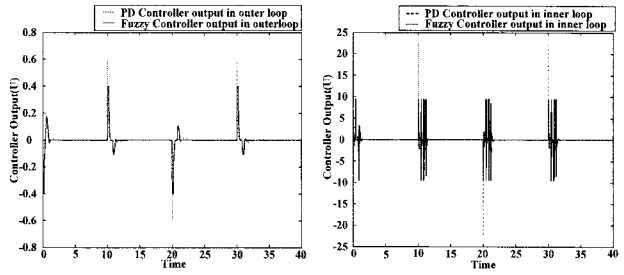


(a) PD cascade controller (b) Fuzzy cascade controller

그림 8 PD 직렬형 제어기와 퍼지 직렬형 제어기에서의 공정 출력(α, θ)

Fig. 8 Processor output(α, θ) of PD and fuzzy cascade controller individually

그림 8은 PD 직렬형 제어기와 퍼지 직렬형 제어기에서의 α, θ값의 응답을 보여준다. 퍼지 직렬형 제어기는 PD 직렬형 제어기보다 각도의 변화는 크지만 α, θ값의 반응시간이 짧아 훨씬 빠르게 수렴된 것으로 보인다.



(a) Controller output in outer loop (b) Controller output in inner loop

그림 9 PD 직렬형 제어기와 퍼지 직렬형 제어기에서 각 루프의 제어기 출력

Fig. 9 Controller outputs of each loop in PD and fuzzy cascade controller

그림 9는 외부와 내부 루프에 있는 PD 제어기와 퍼지 제어기의 출력을 나타낸다. 외부 루프의 결과에서는 퍼지 제어기가 PD 제어기보다 적은 출력을 낸다. 내부 루프에서의 퍼지 제어기는 출력을 빠르게 변화시키어 신속하게 모터를 제어한다.

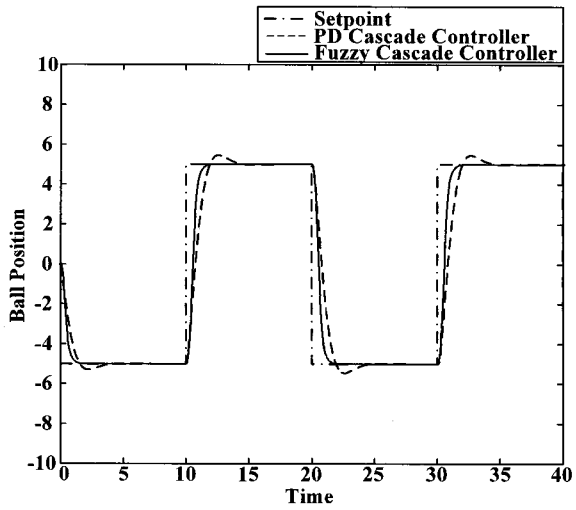


그림 10 PD 직렬형 제어기와 퍼지 직렬형 제어기 시뮬레이션 결과 비교

Fig. 10 Comparison of PD and fuzzy cascade controller simulation

그림 10의 시뮬레이션 결과에서 나타나듯이 퍼지 직렬형 제어기는 오버슈트가 없고 PD 직렬형 제어기에 비해 견실한 성능을 보이며, 설정치에 대한 수렴속도 또한 우수한 것으로 나타난다. 표 6은 제어 성능의 시간적 해석으로 시뮬레이션 상에서의 PD 직렬형 제어기와 퍼지 직렬형 제어기의 오버슈트 및 정상상태의 오차를 보여준다. 제안된 퍼지 직렬형 제어기는 Maximum Overshoot(%)에서 우수한 성능을 보인다. 또한 Delay time, Rise time과 Settling Time에서도 기존의 PD 직렬형 제어기에 비해 우수한 성능을 보이는 것으로 나타난다.

표 6 PD 직렬형 제어기와 퍼지 직렬형 제어기 성능 비교(in Simulation)

Table 6 Performance comparison between PD and fuzzy cascade controllers(in simulation)

	PD cascade controller	Fuzzy cascade controller
Maximum Overshoot(%)	5.02%	0%
Delay time	0.81s	0.59s
Rise time	0.60s	0.51s
Settling time	2.97s	1.68s
Steady-state Error	0	0

그림 11는 실제 볼빔 시스템에 대하여 시뮬레이션에 사용된 파라미터를 적용한 결과이다. 실제 플랜트와 시뮬레이션 결과의 차이는 볼의 관성, 빔에서의 위치 측정 오차, 실험의 장소와 환경 등에 의해서 비선형적 특성이 달라지기 때문이다. 실제 볼빔 시스템에서도 퍼지 직렬형 제어기는 PD 직렬형 제어기보다 빠르고 안정적인 제어를 보여준다. 표 7은 실제 플랜트 상에서의 PD 직렬형 제어기와 퍼지 직렬형 제어기의 Maximum Overshoot(%), Delay time, Rise time과 Settling Time를 나타낸다.

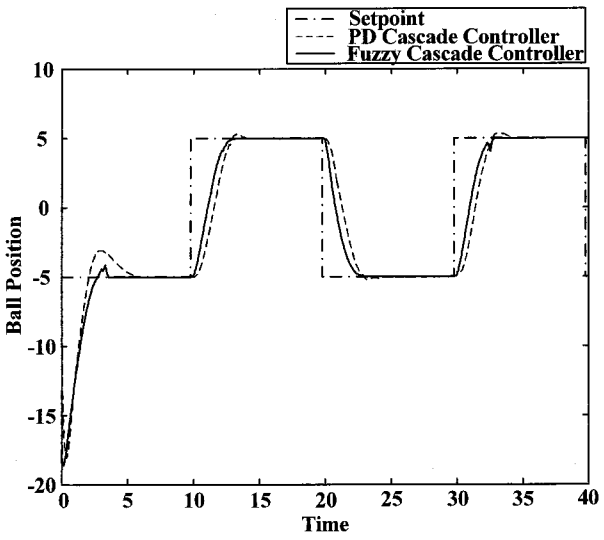


그림 11 실제 Plant 결과 비교

Fig. 11 Comparison of experimental verification result of PD and fuzzy cascade controller

0에서 10초사이는 실제 볼빔 시스템의 초기 위치에 대한 결과를 나타낸다. 이때 두 제어기의 성능을 비교할 때 기존의 PD 직렬형 제어기는 레퍼런스의 변화가 크거나 초기값의 영향으로 오버슈트가 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. 하지만 제안된 퍼지 직렬형 제어기는 레퍼런스의 변화와 초기값에 영향에 대해서도 견실한 성능을 보인다.

6. 결 론

본 논문에서는 볼빔 시스템에 제어를 위한 퍼지 직렬형 제어기를 설계하고, PSO 알고리즘을 이용하여 제어기의 파라미터를 최적화하였다.

비선형성 특성을 갖는 볼빔 시스템 제어를 위하여 두 개의 내부 및 외부 퍼지 제어기로 구성된 퍼지 직렬형 제어구조를 제안하였다. 내부 퍼지 제어기는 모터의 위치제어를 위해 사용되고, 외부 퍼지 제어기는 볼의 위치변화에 따른 내부 퍼지 제어기의 설정치를 결정하는 역할을 한다. 또한 PSO 알고리즘을 사용하여 두 개의 퍼지 제어기의 파라미터들을 최적화 하였다. PSO는 직렬 유전자 알고리즘(SGA)보다 적은 세대안에서 빠르게 최적점에 도달하는 것을 보여주었다. 또한, 다차원의 문제에서도 뛰어난 성능을 나타낸다.

표 7 PD 직렬형 제어기와 퍼지 직렬형 제어기 성능 비교(in experiment)

Table 7 Performance comparison between PD and fuzzy cascade controllers(in experiment)

	PD cascade controller		Fuzzy cascade controller	
	0~10s	10~20s	0~10s	10~20s
Maximum Overshoot	27.43%	3.75%	14.38%	0%
Delay time	1.29s	1.90s	1.37s	1.45s
Rise time	1.54s	2.04s	1.71s	1.87s
Settling time	5.11s	4.08s	4.02s	3.12s
Steady-state Error	0	0	0	0

본 논문에서는 PD 직렬형 제어구조와 퍼지 직렬형 제어구조 및 SGA와 PSO 알고리즘의 비교를 수행하였다. 퍼지 직렬형 제어기는 PD 직렬형 제어기보다 모터의 각(θ)과 빔의 기울기(α)의 응답이 빠름을 알 수 있었다. 외부 루프에 퍼지 제어기는 PD 제어기보다 적은 출력을 발생하며 내부 루프의 퍼지 제어기는 적은 출력을 입력으로 받아 큰 출력을 내어 모터를 빠르게 제어한다. 따라서 볼의 위치에 대한 제어에서는 PD 직렬형 제어기보다 퍼지 직렬형 제어기가 오버슈트가 없고 훨씬 더 빠르게 수렴한다. 또한 PSO는 SGA보다 제어기 파라미터 최적화에 보다 우수한 특성을 보임을 알 수 있었다.

감사의 글

이 논문은 2007년 및 2008년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2007-313-D00710, KRF-2008-314-D00376).

참 고 문 헌

[1] H. J. Lee, J. B. Park and G. Chen, "Robust Fuzzy Control of Nonlinear Systems with Parametric Uncertainties," *IEEE Trans. on Syst.*, Vol. 9, No. 2, pp. 369-379, 2001.

[2] H.-N. Wu and K.-Y. Cai, "Robust fuzzy control for uncertain discrete-time nonlinear Markovian jump systems without mode observations," *Information Sciences* Vol. 177, Issue 6, pp. 1509-1522, 2007.

[3] J. Hauser, S. Sastry and P. Kokotovic, "Nonlinear control via approximate input-output linearization : the ball and beam example," *Automatic Control, IEEE Trans. on*, Vol. 37, Issue 3, pp.392-398, 2002.

[4] L. Wang, "Stable and Optimal Fuzzy Control of Linear Systems," *IEEE Trans. on Fuzzy Syst.* Vol. 6, No. 1, pp.137-143, 1998.

[5] B. C. Chang, Hary Kwtany, and Shr-Shuing Hu, "An Application of Robust Feedback Linearization to a Ball and Beam Control problem," *Proc. of the IEEE Int'l. Conf. on Control Appl.*, pp. 694-698, 1998.

[6] Jacob S. Glower and Jeffrey Munighan, "Designing Fuzzy Controllers from a Variables Structures Standpoint," *IEEE Trands. on Fuzzy Syst.*, Vol. 5, No. 1, pp. 138-144, 1997.

[7] John Hauser, Shankar Sastry and Peter Kokotovic, "Nonlinear Control Via Approximate Input-output Linearization: The Ball and Beam Example," *IEEE Trans. on Automatic Control*, Vol. 37, No. 3, pp. 392-398, 1992.

[8] S. Tong, T. Wang and H.-X. Li, "Fuzzy robust tracking control for uncertain nonlinear systems" *International Journal of Approximate Reasoning*, Vol. 30, Issue 2, pp. 73-90, Jun., 2002

[9] S.-K Oh, W. Pedrycz, S.-B Rho and T.-C. Ahn, "Parameter estimation of fuzzy controller and its application to inverted pendulum" *Engineering Application of Artificial Intelligence*, Vol. 17, Issue 1, pp. 37-60, Feb. 2004.

[10] K.-S Kim, B.-J Park and S.-K Oh, "The Design of Polynomial Network Pattern Classifier based on Fuzzy Inference Mechanism and Its Optimization", *KFIS*, Vol. 17, No. 7, pp970-976, 2007.

[11] J. Kennedy, "The particle swarm: Social adaptation of knowledge," *Proc. IEEE Int. Conf. Evolutionary Comput.*, pp. 303-308, 1997.

[12] S. Skogestand, "Simple analytic rules for model reduction and PID controller tuning", Journal of Process Control, Vol. 13, Issue 4, pp. 291-309, 2003.

[13] C. C. Hang, K. J. Astrom and Q. G. Wang, "Relay feedback auto-tuning of process controllers-a tutorial review", *Journal of Process Control*, Vol. 12, Issue 1, pp 143-162, 2002.

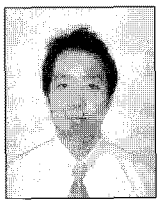
[14] W. K. Ho, T. H. Lee, H. P. Han and Y. Hong, "Self-Tuning IMC-PID Control with Interval Gain and Phase Margins Assignment", *IEEE Trans. On Control Syst.*, Vol. 9, Issue 3, pp. 535-541, 2001.

[15] S. Daley and G. P. Liu, " Optimal PID tuning direct search algorithms", *Computing & Control Enginerring Journal*, Vol. 10, Issue 2, pp. 51-56, 1999.

[16] K. Suyama, "A Practical Design Method for PID Control System", *SICE*, Vol. 29, No. 2, pp. 236-238, 1993.

[17] K. K. Tan, H. Dou, T. Chen and T. G. Lee, " High Precision Linear Motor Contorl via Relay-Tuning and Iterative Learning Based on Zero-Phase Filtering", *Control Syst. Tech., IEEE Trans. on*, Vol. 9, Issue 2, pp. 244-253, 2001.

저 자 소 개



장 한 종 (張 漢 鍾)

2007년 : 수원대 전기전자공학과 졸업.
2007년~현재 : 동 대학원 전기공학과 석사과정.
관심분야 : 퍼지 제어, 퍼지 추론 시스템, 신경회로망, 지능형 시스템, 최적화 알고리즘.
Tel : (031) 222-6544.
E-mail : jjangjong@suwon.ac.kr

오 성 권 (吳 聖 權)

1981년 : 연세대학교 전기공학과 졸업.
1983년 : 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사).
1983~1989년 : 금성산전연구소(선임연구원).
1993년 : 연세대 대학원 전기공학과 졸업(공학박사).
1996~1997년 : 캐나다 Manitoba대학 전기 및 컴퓨터공학과 Post-Doc.
1993~2005년 : 원광대 전기전자 및 정보공학부 교수
2005년~현재 : 수원대 전기공학과 교수.
2002년~현재 : 대한전기학회, 퍼지및지능시스템학회 및 제어자동화시스템 공학회 편집위원.
관심분야 : 시스템자동화, 퍼지이론 및 제어, 컴퓨터 지능 등.
Tel : (031) 229-8162
E-mail : ohsk@suwon.ac.kr