

볼빔 시스템에 대한 계층적 공정 경쟁 유전자 알고리즘을 이용한 최적 퍼지 cascade 제어기 설계

論 文

58-2-27

Design of Optimized Fuzzy Cascade Controller Based on HFCGA for Ball & Beam System

張 漢 鍾* · 吳 聖 權† · 金 賢 起**

(Han-Jong Jang · Sung-Kwun Oh · Hyun-Ki Kim)

Abstract - In this study, we introduce the design methodology of an optimized fuzzy cascade controller with the aid of hierarchical fair competition-based genetic algorithm(HFCGA) 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. The displacement change the position of ball leads to the change of the angle of the beam which determines the position angle of a servo motor. Consequently the displacement change of the position of the moving ball and its ensuing change of the angle of the beam results in the change of the position angle 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 factors) of each fuzzy controller using HFCGA. The inner controller controls the position of lever arm which corresponds to the position angle of a servo motor and the outer controller decides the set-point value of the inner controller. HFCGA is a kind of parallel genetic algorithms(PGAs), and helps alleviate the premature convergence being generated in conventional genetic algorithms(GAs). 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 HFCGA, is presented in comparison with the conventional PD cascade controller based on serial genetic algorithms.

Key Words : Fuzzy Cascade Controller, PD Cascade Controller, Hierarchical Fair Competition Genetic Algorithm, Ball & Beam System

1. 서 론

산업내에 대부분의 기계장치들은 심한 비선형성과 불확정성을 가지고 있다. 따라서, 산업의 기계장치들은 일반적인 비선형 시스템의 제어 이론과 제어기 설계에 어려움이 있어 왔다. 지난 20년동안 비선형 시스템에 대하여 제어기 설계 상에서의 어려움을 극복하기 위해서 다양한 구조가 개발되어졌다[1]. 과거 10년부터, 비선형 시스템의 퍼지제어는 급격하게 성장하고, 많은 분야에 성공적으로 적용되었다[2].

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 cascade 제어기 등이 제시되었다. 그 중 PD cascade 제어기는 두 형태의 내

부와 외부 제어기로 구성된다. 내부 제어기는 모터의 위치 제어에 사용되고 외부 제어기는 볼의 위치변화에 따른 내부제어기의 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 않은 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 cascade 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.

진보된 시스템 제어를 위하여 앞선 변화는 설계 방법과 상세한 알고리즘의 다양성에 의한 결과로서 생긴다. 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

† 교신저자, 正會員 : 水原大學 工大 電氣工學科 教授 · 工博

E-mail : ohsk@suwon.ac.kr

* 準 會 員 : 水原大 工大 電氣工學科 碩士課程

** 正 會 員 : 水原大學 電氣工學科 教授 · 工博

接受日字 : 2008年 2月 16日

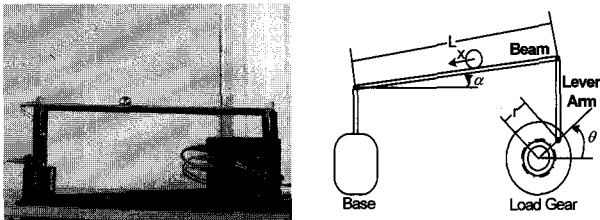
最終完了 : 2008年 11月 28日

퍼지제어기의 성능을 크게 좌우한다[9].

기존의 직렬형 유전자 알고리즘 (Serial Genetic Algorithms: SGAs)은 세대가 늘어남에 따라 염색체의 다양성을 잃어 버려 조기수렴 문제를 내포한다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 병렬 유전자 알고리즘의 한 구조인 계층적 공정 경쟁 유전자 알고리즘(Hierarchical Fair Competition Parallel Genetic Algorithm: HFCGA)을 이용한다[11]. 본 논문에서는 퍼지 cascade 제어기의 파라미터를 계층적 공정 경쟁 유전자 알고리즘을 사용하여 최적화한다. 시뮬레이션과 실제 볼빔 시스템에 대한 제어기의 성능을 나타내고 PD cascade 제어기와 비교하여 퍼지 cascade 제어기의 우수성을 보인다. 또한 퍼지 cascade와 PD cascade 제어기의 최적 파라미터에 대하여 직렬 유전자 알고리즘과 계층적 공정 경쟁 병렬 유전자 알고리즘을 비교하고 실제 적용 가능성에 대하여 언급한다.

2. 볼빔 시스템의 입출력 모델

볼빔 시스템의 간략한 모델 구성은 그림 1과 같다[13,15].



(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

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. 급속 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, 볼과 빔에 대한 전달함수이다. 위 시스템에는 크게 2가지 힘이 작용한다. x방향의 중력(F_{tx})과 볼의 회전력(F_{rx})이 존재하게 된다. x방향의 중력은 식(1), 볼의 회전력은 식(2)로 표현된다.

$$F_{tx} = mgs\sin\alpha \tag{1}$$

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

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.

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

식(3)을 다시 정리하면 식(4)와 같다.

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

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 시스템[19]의 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 빔 (beam)의 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 cascade 제어구조

기존의 PD cascade 제어기는 그림 2와 같다. 모터와 빔이 서로 영향을 주는 특수한 시스템에 대하여 cascade 형식의 제어를 사용한다. Cascade 형식의 제어기는 외란을 잘 소거시키고 제어 루프의 동특성 성능을 개선시킨다. 직렬로 연결된 cascade 시스템은 내부의 제어과정에 설정치가 변화되면 전체적인 시스템에 큰 영향을 준다. 이러한 변화에 쉽게 대응하고 보상하기 위하여 견실한 제어기로서 퍼지 cascade 제어기가 제안된다[20].

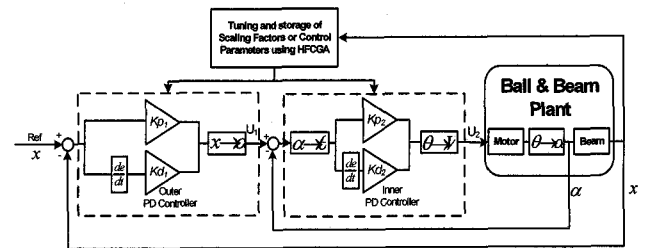


그림 2 PD cascade 제어기 구조

Fig. 2 PD cascade controller architecture

Fig. 2의 기본 PD cascade 제어기에서, 식 (5)와 (6)을 이

용하여 각 루프의 보상된 시스템의 전방향 경로 전달함수는 다음과 같다.

$$U_1(s) = \frac{5g(Kp_1 + Kd_1s)}{7s^2} \quad (11)$$

$$U_2(s) = \frac{\eta_f \eta_m K_m K_g (Kp_2 + Kd_2s)}{J_{eq} R_m s^2 + (B_{eq} R_m + \eta_f \eta_m K_m K_g K_g^2) s} \quad (12)$$

여기서, 각 파라메터의 설명은 표 2에 나타난다.

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

$$U_1(t) = Kp_1 E_1(t) + Kd_1 \frac{dE_1(t)}{dt} \quad (13)$$

$$U_2(t) = Kp_2 E_2(t) + Kd_2 \frac{dE_2(t)}{dt} \quad (14)$$

여기서, Kp_i 는 외부 제어루프의 비례이득과 내부 제어루프의 비례이득($i=1, 2$), Kd_i 는 외부 제어루프의 미분이득과 내부 제어루프의 미분이득, E_i 는 외부 제어루프의 오차와 내부 제어루프의 오차이다.

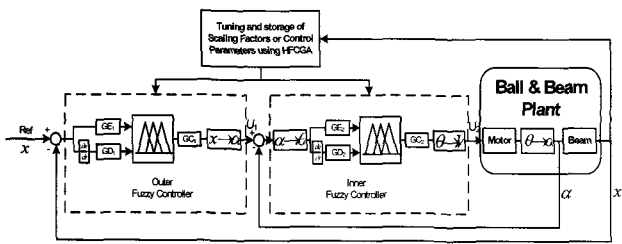


그림 3 퍼지 cascade 제어기 구조
Fig. 3 Fuzzy cascade controller architecture

본 연구에서는 볼빔 시스템을 정밀하고 안정적이며 최적의 제어하기 위하여 그림 3과 같이 앞서 설명한 퍼지 제어기 두 개를 결합시킨 퍼지 cascade 제어기구조를 나타낸다. 여기서, GE_i 및 GD_i 는 입력(오차변화)의 퍼지 환산계수, GC_i 는 제어 출력의 퍼지 환산계수를 의미한다($i=1,2$).

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.

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

여기서, R^k 는 k 번째의 제어규칙($k=1, 2, \dots, m$), E_i 는 외부 제어루프의 오차와 내부 제어루프의 오차($i=1, 2$), ΔE_i 는 외부 제어루프의 오차의 변화량과 내부 제어루프의 오차의 변화량이다. $A_i^k, A_{\Delta E_i}^k$ 는 퍼지 변수, U_i 는 외부 제어루프의 출력과 내부 제어루프의 출력이며 B^k 는 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.

$$\text{외부 제어루프의 전반부 적합도} : w_{1k} = \min \mu_{A_i^k}(E), \mu_{A_{\Delta E_i}^k}(\Delta E) \quad (16)$$

$$\text{내부 제어루프의 전반부 적합도} : w_{2k} = \min \mu_{A_i^k}(E), \mu_{A_{\Delta E_i}^k}(\Delta E) \quad (17)$$

$$\text{외부 제어루프의 후반부 추론 결과 값} : U_1^* = \frac{\sum_{k=1}^m w_{1k} B^k}{\sum_{k=1}^m w_{1k}} \quad (18)$$

$$\text{내부 제어루프의 후반부 추론 결과 값} : U_2^* = \frac{\sum_{k=1}^m w_{2k} B^k}{\sum_{k=1}^m w_{2k}} \quad (19)$$

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

$$\text{최종적인 외부 제어루프의 출력} : U_1(t) = U_1^*(t) Gc_1 \quad (20)$$

$$\text{최종적인 내부 제어루프의 출력} : U_2(t) = U_2^*(t) Gc_2 \quad (21)$$

전반부 및 후반부의 언어적 제어 변수인 오차(E), 오차의 변화값(ΔE) 및 제어 출력(U)은 각각 NB(Negative Big), NM (Negative Middle), NS(Negative Small), ZO(zero), PS (Positive Small), PM(Positive Middle), PB(Positive Big)의 7개로 구성되어 있으며 전체적인 제어 규칙은 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. 식 15의 각각의 제어규칙에 있어 전반부의 추론결과 값은 식 16, 17과 같고 비퍼지화(defuzzification)과정을 거친 후반부 추론 결과 값은 식 18, 19와 같다.

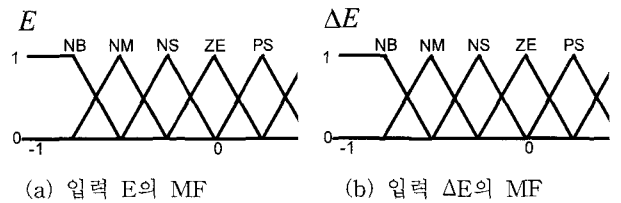


그림 4 각 입력에 대한 Membership Functions
Fig. 4 Membership functions of the premise input variables

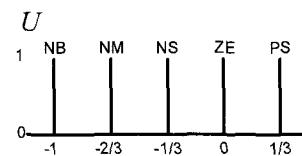


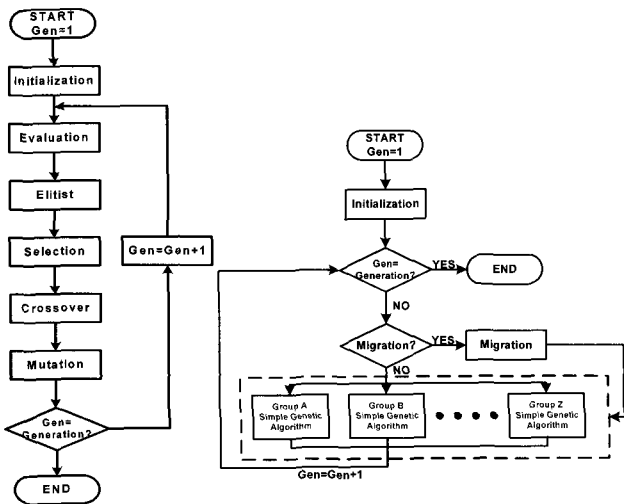
그림 5 출력에 대한 Membership Function
Fig. 5 Membership function defined in the consequence variable, U

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 모터 위치를 제어 하여 레버 압의 각인 θ 를 정확한

위치로 제어한다. 이에 따라 빔의 기울기인 α 가 변하게 되어 불은 원하는 위치로 이동된다. 퍼지 cascade 제어기에서 주의할 점은 내부의 루프가 급변하게 되면 비선형성이 강한 외부의 제어가 힘들어지게 된다. 따라서, 불빔 시스템은 내부 루프와 외부 루프에 정확하고 안정적인 제어가 필요하다. 하지만, 서론에서 언급했듯이 건설한 성능을 가진 퍼지 제어기는 최적의 파라미터 및 환산계수를 구하는 것은 쉽지 않다. 그러므로, 파라미터와 환산계수는 다음장에 나오는 최적화 이론인 계층적 공정 경쟁 병렬 유전자 알고리즘을 이용하여 튜닝을 한다.

4. 계층적 공정 경쟁 유전자 알고리즘에 의한 제어 파라미터 최적화

직렬 유전자 알고리즘(Serial Genetic Algorithms ; SGAs)은 유전학과 자연환경에서 일어나는 진화원리와 적자 생존의 법칙을 모방하여 만들어낸 최적화 알고리즘으로써 다차원의 해의 탐색 능력이 뛰어나며 현대에 많은 응용분야에 적용되고 있는 실정이다. 하지만, 직렬 유전자 알고리즘은 염색체들의 다양성이 결여되어 모든개체들이 최적의 해가 아닌 일정지역의 부분 최적해 안으로 수렴하게 되는 조기 수렴 문제를 내포한다. 이러한 현상은 높은 차수 문제(high-dimensionality problems)와 다봉성을 가진 문제(multi-modal problems)에 있어서 더욱 많이 발생한다[12].



(a) 기본 직렬 유전자 알고리즘 (b) 병렬 유전자 알고리즘
 그림 6 기본 직렬 유전자 알고리즘과 병렬 유전자 알고리즘 순서도

Fig. 6 The flow chart of serial and parallel genetic algorithms

직렬 유전자 알고리즘(SGAs)의 문제점을 해결하기 위하여 병렬 유전자 알고리즘(Parallel Genetic Algorithms ; PGAs)이 제시된다. 그림 7과 같이 계층적 공정 경쟁 유전자 알고리즘은 여러 개의 부분 집단으로 구성되어 있다. 각 부분 집단은 특정 범위의 적합도 안에서 개체들을 수용할 수 있다. 각 부분 집단들은 각 집단의 등급의 범위를 의미하는 허용 문턱값(Admission threshold)을 갖고 있으며 이주할

개체를 저장할 수 있는 허용 버퍼(Admission buffer)가 존재한다. 초기 생성된 랜덤한 개체들은 평가를 통하여 적합도가 구해지고 각 등급별로 부분 집단으로 나뉘게 된다. 그 후 각 집단의 개체들은 다른 집단과 독립적으로 주어진 환경(진화 연산자, 교배율 및 돌연변이율)에 진화하게 되며 일정 세대동안 진화된 후 집단 들 사이에 개체들의 이주가 이루어진다.

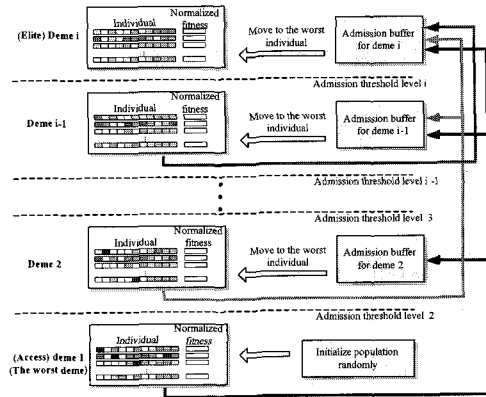


그림 7 계층적 공정 경쟁 유전자 알고리즘의 이주 구조
 Fig. 7 The migration topology of hierarchical fair competition genetic algorithm

이주과정의 단계는 다음과 같다.

[step 1] 각각의 집단 개체들의 적합도를 정규화한다.

$$nf_{ij} = f_{ij}/f_{max} \quad (22)$$

f_{ij} 는 j집단(deme)의 i번째 개체 적합도

f_{max} 는 전체 집단의 최대 적합도

[step 2] 정규화된 적합도를 정해진 문턱 적합도들과 비교하여 일정 적합도 수준에 부합하는 임시버퍼(Admission Buffer: A_{Li})에 개체들을 저장한다.

$$A_{Li} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^{n_j} nf_{j,i} \quad (23)$$

[step 3] 각각의 임시버퍼에 저장된 개체들과 해당하는 집단의 낮은 수준의 개체들을 바꾸어준다. 이때 어떠한 개체도 하위집단의 버퍼로 저장되지 않고 상위로만 올라가게 되는 단방향성을 갖는다. 최하위 수준의 집단은 모든 개체들을 랜덤하게 다시 생성한다.

기존의 PD 제어기의 파라미터 동조는 최적화 알고리즘인 계층적 공정 경쟁 유전자 알고리즘을 이용한다. 퍼지 제어기는 비선형 모델에 강하고 안정성이 뛰어나지만, 파라미터 동조 과정은 계속적인 연구가 진행되고 있으며, 뚜렷한 기법이나 방식들이 나타나지 않고 전문가의 경험에 의하여 파라미터들이 동정들이 되고 있다. 이에 퍼지 제어기의 파라미터 동정도 계층적 공정 경쟁 유전자 알고리즘을 이용하여 최적의 파라미터를 찾는다.

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

$$IAE = \int |e(t)| dt \quad (24)$$

제어기의 파라미터 동정은 제어기 설계에 가장 핵심적인 부분의 하나로서 정확하고 안정적인 제어를 할 수 있도록 최적의 파라미터를 찾아야 한다. 그림 8은 목적함수 IAE에 따른 계층적 공정 경쟁 유전자 알고리즘을 이용하여 최적의 파라미터를 염색체 구조로 나타낸다.

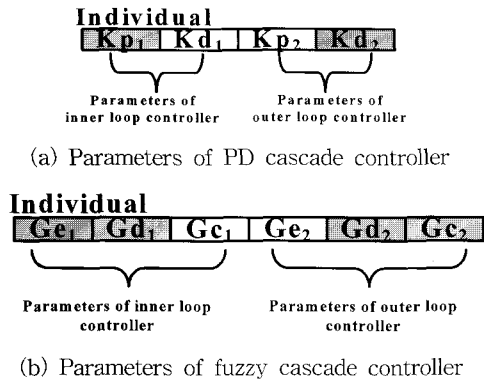


그림 8 염색체내의 제어 파라미터
Fig. 8 Control parameters in chromosomes

계층적 공정 경쟁 유전자 알고리즘은 다차원인 제어기 파라미터들을 지역해에 수렴하지 않고 최적의 파라미터를 찾아낸다. 그림 7에서 나타난 것과 같이 최상위 집단인 엘리트 집단에 각 개체들의 적합도를 비교하여 최적의 파라미터를 찾아서 PD cascade 제어기와 퍼지 cascade 제어기의 파라미터로 선택한다.

5. 실험 및 결과고찰

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

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

퍼지 cascade 제어기의 최적의 파라미터를 찾기 위하여 적용된 직렬 유전자 알고리즘과 계층적 공정 경쟁 유전자 알고리즘의 주요 파라미터와 연산자는 표 3에 나타낸다.

기존의 SGA와 제안된 HFCGA가 동일한 조건하에서 수행하여 그 결과치를 비교하였다.

유전자 알고리즘의 세대수는 300세대로 설정한다. 계층적 공정 경쟁 유전자 알고리즘은 병렬 유전자 알고리즘의 특성을 나타내기 위하여 부분 집단을 나누고 각 부분집단마다 서로 다른 환경을 주어 독립적인 진화가 이루어지게 한다. 또한 이주는 전체 세대수의 10%마다 이주를 하여 부분집단들의 염색체를 교환한다. 문턱적합도가 높은 집단을 엘리트 집단으로 지정하고 열등한 개체들이 많은 집단에 교배율과 돌연변이율을 높여 우수한 염색체로 진화하도록 설정해둔다 [16]. 그림 9는 직렬 유전자 알고리즘과 계층적 공정 경쟁 유전자 알고리즘의 세대별 증가에 의한 IAE값을 나타낸다. 표 4는 목적함수 IAE가 최소가 되는 값이다.

표 5는 PD cascade 제어기의 파라미터(Kp_1, Kd_1, Kp_2, Kd_2)와 퍼지 cascade 제어기의 파라미터($GE_1, GD_1, GC_1, GE_2, GD_2, GC_2$)를 나타낸다. PD cascade 제어기는 4차원의 해를 찾아내고, 퍼지 cascade 제어기는 6차원의 해를 찾아낸다. 이것은 고차원의 문제에서도 최적의 해를 찾아 낼 수 있다는 사실을 나타낸다.

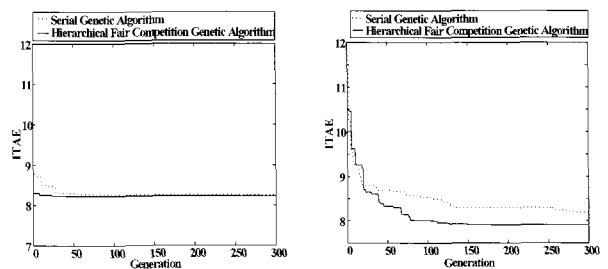
표 2 Ball & Beam 파라미터 변수
Table 2 Parameter variables for Ball & Beam

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/s ²)	9.8
η_g	Gearbox efficiency	0.9
η_m	Motor efficiency	0.36
m	Mass of the Ball(kg)	0.064
F_{tr}	Translational force on the Ball	
F_{rr}	Rotational force on the Ball	
x	Ball Position	
α	Beam pitch	
θ	Servo load gear angle	
V_m	Motor Input voltage	

표 3 직렬 유전자 알고리즘과 계층적 공정 경쟁 유전자 알고리즘의 파라미터 및 연산자 요약

Table 3 Summary of the parameters and operators of the serial and HFC genetic algorithms

	SGA	HFCGA
세대수	300	300
집단크기	150	[30 30 30 30 30]
교배율	0.65	[0.95 0.75 0.65 0.65 0.65]
돌연변이율	0.1	[0.2 0.15 0.1 0.1 0.1]
이주		전체 세대수의 10%마다
문턱적합도		[0 0.1 0.3 0.5 0.85]
Operator	선택연산자 교배연산자 돌연변이연산자 엘리트전략	선형 순위 선택 알고리즘 수정된 단순 교배 알고리즘 균일 돌연변이 알고리즘 사용



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

그림 9 각 제어기의 세대별 IAE
Fig. 9 IAE of each generation from PD and fuzzy cascade controllers

표 4 PD cascade controller와 퍼지 cascade controller의 성능지수의 값(IAE)

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

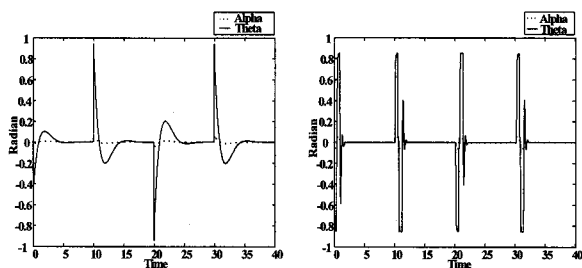
	PD cascade IAE	퍼지 cascade IAE
SGA	8.2521	8.1857
HFCGA	8.2217	7.9056

표 5 PD cascade 제어기와 퍼지 cascade 제어 파라미터

Table 5 Control parameters of PD and fuzzy cascade controller

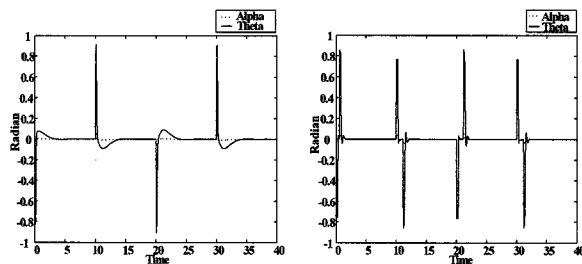
(a) PD cascade controller		(b) Fuzzy cascade controller	
PD cascade 제어기 파라미터		퍼지 cascade 제어기 파라미터	
Kp_1	8.9421	GE_1	4.4596
Kd_1	0.8448	GD_1	1.0059
Kp_2	0.1624	GC_1	9.875
Kd_2	0.072	GE_2	0.619
		GD_2	0.1198
		GC_2	0.2069

그림 10은 PD cascade 제어기와 퍼지 cascade 제어기에서의 α, θ 값의 응답을 보여준다. (a)는 SGA로 튜닝한 PD cascade 제어기와 퍼지 cascade 제어기의 공정출력이다. (a)와 (b)를 비교하였을 때 HFCGA로 튜닝한 제어기가 짧은 시간내에 출력을 내며 보다 완만한 출력값을 내는 것을 보인다. 또한 퍼지 cascade 제어기는 PD cascade 제어기보다 각도의 변화는 크지만 α, θ 값의 반응시간이 짧아 훨씬 빠르게 수렴된 것으로 보인다.



(a-1) PD cascade controller (a-2) Fuzzy cascade controller

a. SGA를 사용한 공정 출력



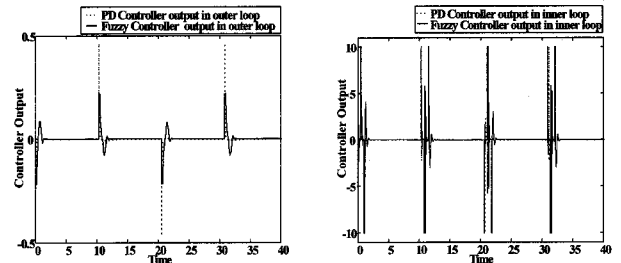
(b-1) PD cascade controller (b-2) Fuzzy cascade controller

b. HFCGA를 사용한 공정 출력

그림 10 PD cascade 제어기와 퍼지 cascade 제어기에서의 공정 출력(α, θ)

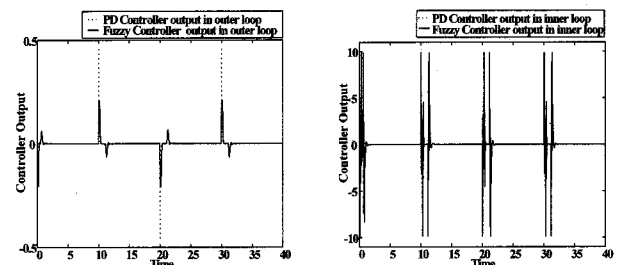
Fig. 10 Processor output(α, θ) of PD and fuzzy cascade controller individually

그림 11은 바깥쪽과 안쪽 루프에 있는 PD 제어기와 퍼지 제어기의 출력을 나타낸다. HFCGA로 튜닝한 제어기들의 각 루프의 제어기 출력값은 SGA로 튜닝한 제어기들의 각 루프의 제어기 출력 값보다 빠르게 반응한다. 그리고 바깥쪽 루프의 결과에서는 퍼지 제어기가 PD 제어기보다 적은 출력을 낸다. 안쪽 루프에서의 적은 출력을 입력으로 받아 퍼지 제어기가 많은 출력을 내며 빠르게 모터를 제어한다.



(a-1) Controller output in outer loop (a-2) Controller output in inner loop

a. SGA를 사용한 각 루프의 제어기 출력

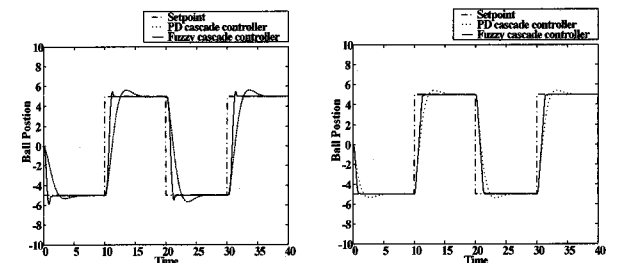


(b-1) Controller output in outer loop (b-2) Controller output in inner loop

b. HFCGA를 사용한 각 루프의 제어기 출력

그림 11 PD cascade 제어기와 퍼지 cascade 제어기에서 각 루프의 제어기 출력

Fig. 11 Controller outputs of each loop in PD and fuzzy cascade controller



(a) SGA로 튜닝된 시뮬레이션 결과 (b) HFCGA로 튜닝된 시뮬레이션 결과

그림 12 PD cascade 제어기와 퍼지 cascade 제어기 시뮬레이션 결과 비교

Fig. 12 Comparison of PD and fuzzy cascade controller simulation

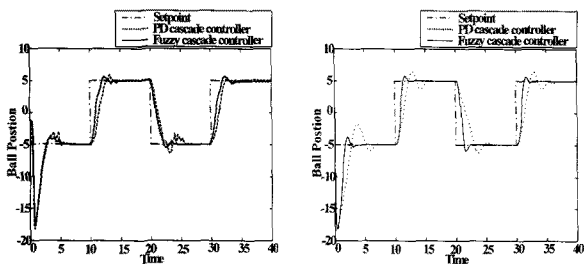
그림 12의 시뮬레이션 결과에서 나타나듯이 SGA로 튜닝된 제어기들의 성능보다 HFCGA로 튜닝된 제어기의 성능이 더욱더 안정화되고 견실하게 되었다고 보여진다. 여기서 HFCGA로 튜닝된 퍼지 cascade 제어기는 오버슈트가 없어 PD cascade 제어기에 비해 우수한 성능을 보이며, 설정치에 대한 수렴속도 역시 빨라 Settling time에서도 좋은 성능을 나타낸다. 또한, Delay time과 Rise time에 있어서도 좋은 성능을 나타낸다. 표 6은 시뮬레이션 상에서의 PD cascade 제어기와 퍼지 cascade 제어기의 성능 비교를 보여준다.

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

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

	SGA		HFCGA	
	PD cascade controller	Fuzzy cascade controller	PD cascade controller	Fuzzy cascade controller
Maximum Overshoot	6.53%	4.27%	4.98%	0%
Delay Time	1.03초	0.69초	0.83초	0.60초
Rise Time	0.86초	0.49초	0.66초	0.54초
Settling Time(2%이내)	4.14초	1.73초	4.02초	1.60초
Steady-state Error	0	0	0	0

그림 13은 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 SGA로 튜닝된 제어기들보다 HFCGA로 튜닝된 제어기들이 보다 최적의 제어를 실행하는 것을 보인다. 또한 퍼지 cascade 제어기는 PD cascade 제어기보다 빠르고 안정적인 제어를 보여준다. 표 7은 실제 플랜트 상에서의 PD cascade 제어기와 퍼지 cascade 제어기 성능을 나타낸다.



(a) SGA로 튜닝된 실제 Plant 결과 (b) HFCGA로 튜닝된 실제 Plant 결과

그림 13 실제 Plant 결과 비교

Fig. 13 Comparison of experimental verification result of PD and fuzzy cascade controller

6. 결론

본 논문에서는 볼빔 시스템에 제어를 위한 퍼지 cascade 제어기를 설계하고, 계층적 공정 경쟁 병렬 유전자 알고리즘을 이용하여 제어기의 파라미터를 최적화하였다.

최적 퍼지 cascade 제어기는 비선형 특성을 갖는 볼빔 시스템에 대하여 견실한 성능을 보였다. 이것은 물건 반송 로봇의 운반체 균형 문제 및 2 자유도 구분 이동 로봇 등의 다른 비선형 특성을 지니는 시스템에서도 안정성 및 견실성에 대하여 우수성을 나타낼 수 있음을 나타낸다

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

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

	SGA		HFCGA	
	PD cascade controller	Fuzzy cascade controller	PD cascade controller	Fuzzy cascade controller
Maximum Overshoot	6.21%	5.35%	10%	6.67%
Delay Time	1.74초	1.13초	1.67초	1.09초
Rise Time	1.41초	1.24초	1.33초	1.02초
Settling Time(2%이내)	3.62초	2.31초	3.40초	2.01초
Steady-state Error	0	0	0	0

본 논문에서는 PD cascade 제어구조와 퍼지 cascade 제어구조 및 SGA와 HFCGA의 비교를 수행하였다. 퍼지 cascade 제어기는 PD cascade 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 cascade 제어기보다 퍼지 cascade 제어기가 오버슈트가 없고 훨씬 더 빠르게 수렴한다. 또한 HFCPGA는 SGA보다 제어기 파라미터 최적화에 보다 우수한 특성을 보임을 알 수 있었다.

감사의 글

2008년도 한국전자통신연구원의 재원으로 지원을 받아 수행된 연구임 (과제번호:2008-35MIC), 그리고 이 논문은 2008년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (KRF-2008-314-D00376).

참고 문헌

- [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] M. Denna, G. Mauri and A. M. Zanaboni, "Learning Fuzzy Rules with Tabu Search-An Application to Control," IEEE Trans. on Fuzzy Syst., Vol. 7, No. 2, pp. 295-318, 1999.

[11] R. Lohmann, "Application of Evolution Strategy in Parallel Populations" Parallel Problem Solving from Nature, Lecture Notes in Computer Science, H.-P. Schwfelf and R. M. ä nner(Eds), Springer-Verlag, Vol. 496, pp. 198-208, 1991.

[12] J.-N. Choi, S.-K. Oh and K.-S. Seo, "Simultaneous Optimization of ANFIS-Based Fuzzy Model Driven to Data Granulation and Parallel Genetic Algorithms," LNCS, Vol. 4493, pp. 225-230, 2007.

[13] SVR 02 System, www.quanser.com

[14] D. Yu, G. Li, S. Wang and H. Hu, "A FUZZY CAS- CADED CONTROL FOR AN INVERTED PENDULUM", Internatinal Journal of Information and Systems Sciences, Vol. 3, No. 4, pp. 663-675, 2007.

[15] F. Andreev, D. Auckly, S.Gosavi, L. Kapitanski, A. Kelkar and W. White, "Matching, linear systems, and the ball and beam", Automatica, Vol. 38, Issue 12, pp. 2147-2152, 2002.

[16] Mohammad Saniee Abadeh, Jafar Habibi, Zeynab Barzegar and Muna Sergi, "A parallel genetic local search algorithm for intrusion detection in computer networks", Engineering Applications of Artificial Inteligece, Vol. 20, Issue 8, pp. 1058-1069, 2007.

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 컴퓨터공

학과 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



김 현 기 (金賢起)

1977년 : 연세대학교 전기공학과 졸업.
1985년 : 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 1991년 : 동 대학원 졸업(공학박사). 1997년~현재 : 경기지역 산학연 기술지원단 단장. 1998년~현재 : 산업기술정책연구소 심의위원. 2000년~현재 : 사단법인 산학연 컨소시엄 전국협의회 회장. 1989년~현재 : 수원대학교 전기공학과 교수. 관심분야 : 시스템자동화 및 감시제어, 지능형모델링 및 제어 등.

Tel : (031) 220-2300

E-mail : hkkim@suwon.ac.kr