

병렬유전자 알고리즘 기반 최적 Fuzzy PD Cascade 제어기의 설계

Design of Optimized Fuzzy PD Cascade Controller Based on Parallel Genetic Algorithms

정승현* · 최정내** · 오성권*** · 김현기***

Seung-Hyun Jung*, Jeung-Nae Choi**, Sung-Kwun Oh*** and Hyun-Ki Kim***

* LG 전자

** 대림 대학

*** 수원 대학교

요 약

본 논문은 회전형 역 진자 시스템(Rotary Inverted Pendulum System : RIPS)의 제어를 위한 Fuzzy cascade 제어구조를 제안하고 병렬유전자 알고리즘의 하나인 계층적 공정 경쟁 기반 유전자 알고리즘(Hierarchical Fair Competition-based Genetic Algorithms : HFCGA)을 이용한 최적화 방법을 제시한다. 회전형 역 진자 시스템은 Rotating arm의 회전을 통해 Pendulum의 각도를 제어하는 시스템으로써 제어 목적은 Rotating arm을 원하는 위치에 오게 하고 진자를 수직 위치의 불안정 평형 점에 위치하도록 하는 것이다. 본 논문에서는 회전형 역 진자 시스템의 제어를 위해 두개의 Fuzzy 제어기로 구성된 Fuzzy cascade 제어 구조를 설계하고, HFCGA를 이용하여 설계된 제어기의 파라미터를 최적화한다. 시뮬레이션 및 실험에서 SGA와 HFCGA의 성능비교를 통해 HFCGA의 우수성을 보이고, LQR 및 PD cascade 제어기와 제안된 Fuzzy cascade 제어기의 성능 비교를 통하여 제안된 방법의 우수성을 보인다.

키워드 : 회전형 역 진자 시스템, 퍼지 cascade 제어기, 계층적 공정 경쟁 기반 유전자 알고리즘

Abstract

In this paper, we propose the design of an optimized fuzzy cascade controller for rotary inverted pendulum system by means of Hierarchical Fair Competition-based Genetic Algorithms (HFCGA) which is a kind of parallel genetic algorithms. The rotary inverted pendulum system is the system for controlling the inclination of pendulum axis through the adjustment of rotating arm. The control objective of the system is to control the position of rotating arm and to make the pendulum maintain the unstable equilibrium point of vertical position. To control rotary inverted pendulum system, we designs the fuzzy cascade controller scheme consisted of two fuzzy controllers and optimizes the parameters of the designed controller by means of HFCGA. A comparative analysis between the simulation and the practical experiment demonstrates that the proposed HFCGA based fuzzy cascade controller leads to superb performance in comparison with the conventional LQR controller as well as HFCGA based PD cascade controller.

Key Words : Rotary Inverted Pendulum System, Fuzzy Cascade controller, Hierarchical fair competition-based parallel genetic algorithm

1. 서 론

PID 제어기가 선형 시스템에서는 우수한 성능을 보이나 비선형 동적 시스템, 고차 시스템, 수학적 모델링이 어려운 시스템에서는 비효과적이지만 전문가의 지식을 이용하여 적절한 제어출력을 내는 퍼지 제어기[1-5]는, 과도상태에서

큰 오버슈트 없이 설정치에 도달하게 하는 속응성과 강인성이 좋은 제어기법으로 비선형성이 강하고 불확실하며 복잡한 시스템에 효과적이다. 퍼지 제어기는 IF-THEN 형식의 규칙으로부터 제어 입력을 결정하며, PID제어기와 비슷한 형태의 제어 파라미터들을 가지고 있다[6-8]. 이 파라미터들은 시스템과 추론과정의 복잡성으로 인하여 수학적으로 결정하기가 매우 어렵기 때문에, 시행착오법이나 최적화 알고리즘을 이용하여 동조한다.

유전자 알고리즘(Genetic Algorithms : GA)은 전역해를 찾을 수 있는 최적화 알고리즘으로 잘 알려져 있으며, 많은 응용에 성공적으로 사용되고 있다[9-11]. 그러나 탐색 공간이 크거나, 파라미터 수가 많은 경우 지역해에 빠지는 조기 수렴 문제를 내재하고 있다. 조기 수렴문제를 개선하기 위해 병렬 유전자 알고리즘(Parallel Genetic Algorithm : PGA)[12-13]이 개발되었다. PGA는 여러 개의 집단을 형

접수일자 : 2008년 11월 19일

완료일자 : 2009년 5월 14일

이 논문은 2008년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임 [KRF-2008-314-D00376].

그리고 본 연구는 경기도의 경기도지역협력연구센터사업의 일환으로 수행하였음[GRRRC 수원2009-B2, U-city 보안감시 기술협력센터].

성하여 서로 다른 환경에서 개체들이 진화하며 일정 세대간격으로 개체들이 다른 집단으로 이주함으로써 개체들의 다양성을 유지시켜 초기 수렴문제를 해결한다. 특히 병렬 유전자 알고리즘의 한 이주 모델인 계층적 경쟁 기반 유전자 알고리즘 (Hierarchical Fair Competition-based Genetic Algorithm : HFCGA)은 집단의 계층화를 통하여 동등 수준의 개체들 간에 경쟁을 통하여 초기 생성된 열등한 개체의 도태를 방지하여 탐색능력을 향상시킨 알고리즘으로써 큰 탐색 공간을 갖는 문제에 효과적이다[14].

회전형 역 진자 시스템(Rotary Inverted Pendulum System : RIPS)은 자세제어의 기본이 되는 비선형 시스템의 대표적인 예로서, 동역학적인 구조나 장치가 단순하며 수학적 모델이 잘 알려져 있다[16-17]. RIPS의 제어를 위해 많은 제어기법들이 연구되었으며, 특히 LQR 제어기법이 많이 사용되고 있다[5, 15-16]. 그러나 RIPS의 비선형 특성으로 인하여 Pendulum 각의 급격한 변화에 대해 빠른 응답을 얻기가 어렵다. 또한 대부분의 연구들은 Rotating Arm의 위치 고려하지 않고 Pendulum의 각도 제어만을 다루고 있다.

본 논문에서는 회전형 역 진자 시스템의 제어목표로써 Rotating Arm의 위치와 Pendulum의 기울기를 제어한다. Rotating Arm의 위치와 Pendulum의 기울기 제어를 위해 Cascade 제어구조를 사용하였다[18]. 내부 루프 제어를 위해 미분 선형 Fuzzy PD 제어를 사용하고, 외부 루프 제어를 위해 Fuzzy PD 제어를 사용하는 Fuzzy cascade 제어구조를 제안하고, Fuzzy cascade 제어기의 파라미터뿐만 아니라 후반부 멤버십 함수의 정점을 HFCGA를 이용하여 최적화 한다.

시뮬레이션 및 실험에서 SGA와 HFCGA의 성능비교를 통해 HFCGA의 우수성을 보이고, Inverted Pendulum의 최적제어에 자주 응용되는 LQR 제어와 PD Cascade 제어기구조 및 제안된 Fuzzy Cascade 제어기의 시뮬레이션 및 실험을 통하여 성능 비교를 함으로써 제안된 방법의 우수성을 보인다.

2. 회전형 역 진자 시스템(RIPS)

RIPS는 Rotating Arm, Pendulum, Potentiometer, 모터로 구성된다. 이 시스템은 모터를 구동시켜 Rotating Arm을 회전시키고, 이를 통해 Pendulum 축의 각도를 제어하게 된다. 회전형 역 진자 시스템에서 제어목적은 Pendulum의 축의 수직으로 유지시키면서 Rotating Arm을 원하는 위치에 도달하게 하는 것이다.

회전형 역 진자 시스템의 전체적인 구성과 동작은 그림 1과 같고, 모터의 구동이 Rotating Arm의 원운동으로 연결되어 Pendulum의 기울기를 제어하도록 되어있다. Rotating Arm의 위치는 각도 θ 로 표현되며 회전축을 기준으로 왼쪽에 위치했을 때 +로, 오른쪽에 위치했을 때 -로 정의하였으며, Pendulum의 기울기는 각도 α 로 표현되며 수직축으로부터 기울어진 경사각이라 정의하고 오른쪽으로 기울어진 방향을 +방향으로 정의하였다. Euler-Lagrange 방정식과 Lagrangian 방정식을 이용하여 수학적 모델을 구하면 식(1~3)과 같다.

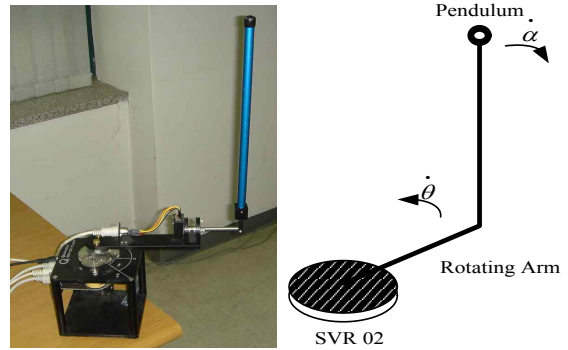


그림 1. 회전형 역 진자 시스템의 구성 및 동작
Fig 1. Structure and action of rotary inverted pendulum system

$$(J_{eq} + mr^2)\ddot{\theta} - mLr \cos(\alpha)\ddot{\alpha} + mLr \sin(\alpha)\dot{\alpha}^2 = T_{output} - B_{eq}\dot{\theta} \quad (1)$$

$$\frac{4}{3}mL^2\ddot{\alpha} - mLr \cos(\alpha)\ddot{\theta} - mgL \sin(\alpha) = 0 \quad (2)$$

$$T_{output} = \frac{\eta_m \eta_g K_t K_g (V_m - K_g K_m \dot{\theta})}{R_m} \quad (3)$$

그리고 Pendulum의 각(α)을 아주 작다고 가정하고, 식(1)~(3)을 선형화하여 상태방정식을 만들면 식(4)와 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{\alpha} \\ \ddot{\theta} \\ \ddot{\alpha} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \frac{bd}{E} & \frac{-cG}{E} & 0 \\ 0 & \frac{ad}{E} & \frac{-bG}{E} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ \alpha \\ \dot{\theta} \\ \dot{\alpha} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ c \frac{\eta_m \eta_g K_t K_g}{R_m E} \\ b \frac{\eta_m \eta_g K_t K_g}{R_m E} \end{bmatrix} V_m \quad (4)$$

여기서, $a = J_{eq} + mr^2$, $b = mLr$, $c = \frac{4}{3}mL^2$,

$d = mgL$,

$E = ac - b^2$, $G = \frac{\eta_m \eta_g K_t K_m K_g^2 + B_{eq} R_m}{R_m}$

본 논문에서 회전형 역 진자 시스템으로써 Quanser사의 SRV02+ROTPEN 제품을 사용하였으며, 시스템의 상태방정식과 출력 방정식은 식(5)와(6)과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{\alpha} \\ \ddot{\theta} \\ \ddot{\alpha} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 33.2953 & -16.7347 & 0 \\ 0 & 67.4805 & -11.8392 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ \alpha \\ \dot{\theta} \\ \dot{\alpha} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 29.4327 \\ 20.8226 \end{bmatrix} V_m \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} \theta \\ \alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ \alpha \\ \dot{\theta} \\ \dot{\alpha} \end{bmatrix} \quad (6)$$

3. Fuzzy Cascade 제어기 설계

본 논문에서는 1입력 2출력의 SIMO (Single Input Multi Output) 시스템인 회전형 역 진자 시스템에 대하여 Cascade 제어구조를 사용하였으며 Fuzzy Cascade 제어기

의 설명에 앞서 선행 연구된 PD Cascade 제어기에 대하여 언급한다. 선행 연구된 PD Cascade 제어기는 그림 2와 같다.

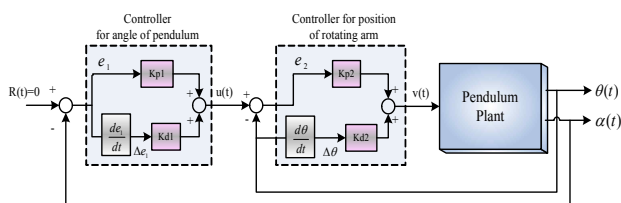


그림 2. PD Cascade 제어기 구조

Fig 2. Structure of PD Cascade controller

PD Cascade 제어기에서 공정에 인가되는 외부 제어루프와 내부 제어루프의 제어신호는 각각 식(7)과 식(8)과 같다.

$$u(t) = Kp_1 \cdot e_1(t) + Kd_1 \cdot \Delta e_1(t) \quad (7)$$

$$v(t) = Kp_2 \cdot e_2(t) + Kd_2 \Delta \theta(t) \quad (8)$$

여기서, $u(t)$, $v(t)$ 는 각각 외부와 내부 제어기의 출력이며, Kp_1, Kd_1 은 내부 루프 제어기의 비례이득과 미분이득, Kp_2 와 Kd_2 는 각각 외부 루프 제어기의 비례이득과 미분이득이다.

PD cascade의 제어기 파라미터로써 Kp_1 , Kd_1 , Kp_2 그리고 Kd_2 가 있으며 GA를 이용하여 동조하였다.

본 연구에서는 선행 연구된 PD cascade 제어기의 성능 향상을 위하여 Fuzzy Cascade 제어기를 제시한다.

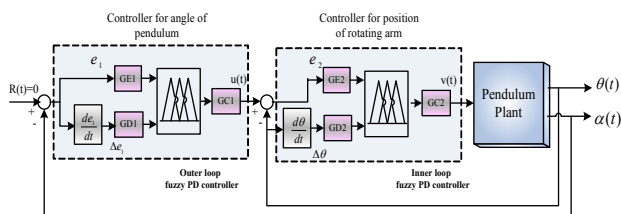
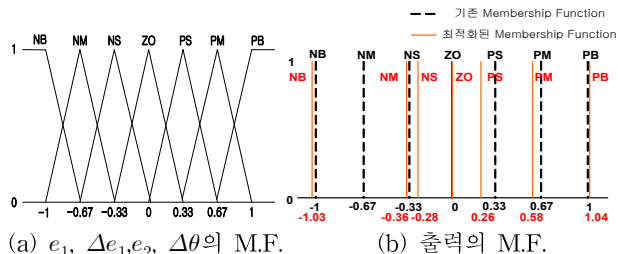


그림 3. Fuzzy Cascade 제어기 구조

Fig 3. Structure of fuzzy cascade controller

설계된 Fuzzy cascade 제어기의 구조는 그림 3과 같다. 외부 루프 제어기로써 Fuzzy PD 제어기를 사용하였으며, 내부 루프 제어기로써 측정치 미분 선행형 Fuzzy PD 제어기를 사용하였다. RIPS의 목표값으로서 Pendulum 축의 기울기와 Rotating arm의 위치를 0도 하였다. 외부 루프 Fuzzy PD 제어기의 입력으로써 e_1 과 Δe_1 을 사용하고 내부 루프의 측정치 미분 선행형 Fuzzy PD 제어기의 입력은 e_2 와 $\Delta \theta$ 를 사용하였다. 그리고 제어기의 출력은 각각 $u(t)$ 와 $v(t)$ 이다.

그림 4는 Fuzzy cascade 제어기에서 사용한 멤버십 함수를 보인다. 그림 4(b)는 싱글톤 타입의 후반부 멤버십 함수를 보이며 최적화 알고리즘을 통하여 멤버십 함수의 정점이 조정되는 것을 보인다. 표 1은 외부 루프 Fuzzy PD 제어기와 내부 루프 측정치 미분 선행형 Fuzzy PD 제어기의 규칙을 보인다.



(a) $e_1, \Delta e_1, e_2, \Delta \theta$ 의 M.F.

(b) 출력의 M.F.

그림 4. Fuzzy cascade 제어기의 M.F.

Fig 4. M.F. of fuzzy cascade controller

외부 루프 Fuzzy PD 제어기와 내부 루프 측정치 미분 선행형 Fuzzy PD 제어기의 규칙은 동일한 형태이며 각각 식(9), 식(10과 같다.

$$R_{out}^k : e_1 \text{ is } A_1^k \text{ and } \Delta e_1 \text{ is } A_2^k \text{ then } u(t) = C_{out}^k \quad (9)$$

$$R_{in}^k : e_2 \text{ is } B_1^k \text{ and } \Delta \theta \text{ is } B_2^k \text{ then } v(t) = C_{in}^k \quad (10)$$

여기서, R_{out}^k 와 R_{in}^k 는 각각 외부와 내부 루프 제어기의 k 번째의 제어규칙이며, $k=1, \dots, N$, A_1^k, A_2^k, B_1^k 그리고 B_2^k 는 퍼지 변수, C_{in}^k 와 C_{out}^k 는 상수 변수, $u(t)$ 는 외부 루프 제어기의 출력, $v(t)$ 는 내부 루프 제어기의 출력이다.

표 1. 제어 규칙 표

Table 1. Rule table for fuzzy controller

(a) 외부 루프 Fuzzy 제어기의 규칙 표

		Δe_1						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
e_1	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

(b) 내부 루프 Fuzzy 제어기의 규칙 표

		$\Delta \theta$						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
e_2	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

외부와 내부 루프 Fuzzy PD 제어기에 대하여 각 규칙의 전반부 적합도는 각각 식(11)과 식(12)처럼 계산되며 추론 결과는 각각 식(13)과 식(14)처럼 구해진다.

$$w_{1k} = \min\{\mu_{A_1^k}(GE_1 \cdot e_1), \mu_{A_2^k}(GD_1 \cdot \Delta e_1)\} \quad (11)$$

$$w_{2k} = \min\{\mu_{B_1^k}(GE_2 \cdot e_2), \mu_{B_2^k}(GD_2 \cdot \Delta \theta)\} \quad (12)$$

$$u(t)^* = \frac{\sum_{k=1}^m w_{1k} \cdot C_{out}^k}{\sum_{k=1}^m w_{1k}} \quad (13)$$

$$v(t)^* = \frac{\sum_{k=1}^m w_{2k} \cdot C_{in}^k}{\sum_{k=1}^m w_{2k}} \quad (14)$$

여기서 w_{1k} 와 w_{2k} 는 각각 외부와 내부 루프 제어기의 각 규칙에 대한 전반부 적합도, $u(t)^*$ 와 $v(t)^*$ 는 각각 외부와 내부 루프 제어기의 추론 결과이다.

외부와 내부 루프 제어기의 최종적인 출력은 각각 식(15)와 식(16)과 같다.

$$u(t) = u(t)^* \cdot GC_1 \quad (15)$$

$$v(t) = v(t)^* \cdot GC_2 \quad (16)$$

Fuzzy cascade 제어기는 PID 제어기와 비슷한 형태의 제어 파라미터들을 가지고 있다. 여기서 $GE_1, GE_2, GD_1, GD_2, GC_1$ 그리고 GC_2 는 환산계수이며 제어기의 성능 안정도를 결정짓는 매우 중요한 파라미터이다. 퍼지 제어기의 파라미터들은 수학적으로 결정하기가 매우 어렵기 때문에, 일반적으로 시행착오를 거쳐 구하거나 유전자 알고리즘 같은 최적화 알고리즘을 이용하여 구한다. 본 논문에서는 이들 제어기의 파라미터뿐만 아니라 후반부 멤버쉽함수의 정점을 SGA와 HFCGA를 사용하여 최적화 하였다.

4. 계층적 공정 경쟁 유전자 알고리즘을 이용한 제어기의 최적화

단순 유전자 알고리즘은 세대가 증가 할수록 염색체들이 비슷해지며 결국 염색체들의 다양성이 결여됨으로써 지역 해에 빠지는 조기수렴 문제를 내재하고 있다. 이러한 현상은 다차원 (high-dimensionality)과 다봉성 (multi-modal)을 가진 문제에서 더욱 많이 발생한다[13].

조기 수렴을 억제하고 전역해를 찾기 위한 해결 방안으로써 병렬 유전자 알고리즘이 제안 되었다[12,13]. 병렬 유전자 알고리즘은 크게 전역 모델(global model), 이주 모델(migration model), 그리고 확산 모델(diffusion model)로 나눌 수 있다. 전역 모델과 확산 모델은 단일 집단을 기반으로 하여 유전자 알고리즘의 계산 속도를 향상시키기 위해 제안된 방법이며 이주모델은 다중 집단을 형성하여 각 집단에서 서로 다른 환경에서 진화가 이루어짐으로써 개체들의 다양성을 유지시키며 일정주기로 개체를 이주시켜 조기 수렴 문제를 개선하고 탐색능력을 향상시키는 방법이다.

이주 모델은 가장 많이 사용되는 모델로써 각 집단들 사이에서 개체들의 이주 방법에 따라 링구조(Ring topology), 이웃 구조(Neighborhood topology), 완전 네트워크 구조(Complete network topology) 그리고 계층적 공정 경쟁(Hierarchical fair competition : HFC).

유전자 알고리즘은 적자 생존의 원리에 기반하여 서로 경쟁을 통하여 우수한 개체가 계속 진화할 수 있다. 일반적으로 초기 생성된 개체는 낮은 적합도를 가지며 높은 적합

도를 갖는 개체로 진화할 수 있는 잠재적인 능력이 있음에도 불구하고 높은 적합도를 갖는 개체와 경쟁으로 인하여 바로 도태되는 경우가 발생한다. HGCGA 사회적 교육 시스템에서 동등 수준을 가진 그룹으로 나누어 학습에 대한 경쟁을 하며, 우수한 인재를 상위 그룹으로 진급하는 체계를 병렬 유전자 알고리즘에 적용한 것으로써, GA의 수행과정에서 각 개체들을 적합도별로 나누어 경쟁을 시킴으로써 공정한 경쟁을 통해 처음 생성된 낮은 수준의 개체가 개선될 기회도 없이 탈락하는 경우를 방지한다. 낮은 수준의 개체도 다음 세대에서 높은 성능을 갖는 개체로 진화하면 그 수준에 맞는 집단으로 바로 이동할 수 있다[14]. HGCGA는 여러 개의 집단이 계층적으로 구성되어있으며, 각 집단은 특정 범위의 적합도를 갖는 개체들로 구성되어 있고, 하위 수준의 집단으로부터 개체의 진입을 위한 문턱적합도를 갖고 있다. 그림 5는 HFCGA에서의 이주구조를 보인다. 이주 과정은 정해진 일정한 세대 간격마다 수행하게 된다. 이주 과정은 다음처럼 3 단계로 구현된다.

[Step 1] 각각의 집단 개체들의 적합도를 정규화한다.

$$nf_{j,i} = f_{j,i} / f_{max} \quad (17)$$

$f_{j,i}$ 는 j집단(demo)의 i번째 개체 적합도, f_{max} 는 전체 집단의 최대 적합도

[Step 2] 정규화된 적합도를 정해진 문턱적합도들과 비교하여 적합도 수준에 맞는 임시버퍼(Admission buffer)에 개체들을 저장한다.

[Step 3] 각각의 임시버퍼에 저장된 개체들과 해당하는 집단의 낮은 수준의 개체들을 바꾸어준다. 그리고 최하위수준의 집단은 모든 개체들을 랜덤하게 다시 생성한다.

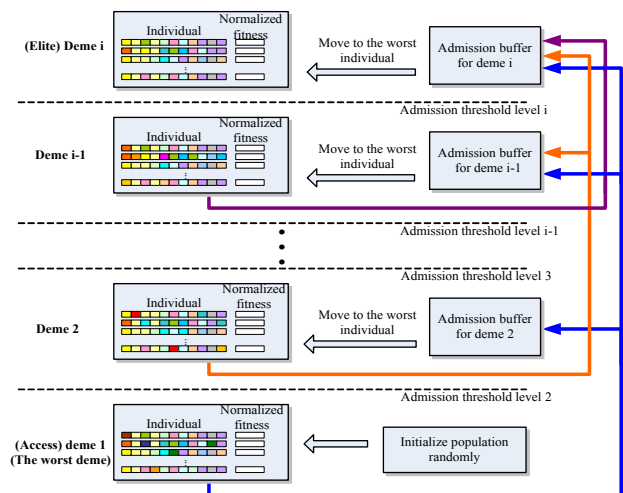


그림 5. HFCGA의 이주구조

Fig 5. The migration topology of HFCGA

본 논문에서는 PD cascade와 Fuzzy cascade 제어기의 파라미터 최적화를 위해 계층적 공정 경쟁 기반 유전자 알고리즘을 사용하였다. 탐색하고자 하는 값은 PD cascade 제어기에서는 Kp_1, Kd_1, Kp_2 그리고 Kd_2 이며, Fuzzy Cascade 제어기에서는 $GE_1, GD_1, GC_1, GE_2, GD_2, GC_2$ 그리고 내부와 외부 루프 Fuzzy 제어기의 후반부 멤버쉽함수의 정점들이다.

본 논문에서는 제어기의 성능 평가지수로써 식(18)의 ITAE(Integral of the Time multiplied by the Absolute value of Error)를 사용하였다. 유전자 알고리즘에서 목적함수로써 식(19)처럼 Pendulum의 각도에 대한 성능지수(\$ITAE_{\theta}\$)와 Rotating Arm의 위치에 대한 성능지수(\$ITAE_{\alpha}\$)의 합을 사용하였다.

$$AE = \int t|e(t)|dt \quad (18)$$

$$f = ITAE_{\theta} + ITAE_{\alpha} \quad (19)$$

5. 시뮬레이션 및 결과고찰

본 논문에서는 RIPS에 대해 PD Cascade 제어기와 Fuzzy Cascade 제어기를 설계하였으며 단순 유전자 알고리즘(GA) 및 HFCGA를 사용하여 제어기의 최적화를 수행하였다. 시뮬레이션 결과를 통해 SGA와 HFCGA의 탐색 능력을 평가하고, 설계된 최적 Fuzzy Cascade 제어기의 성능과 최적 PD Cascade 제어기 및 Inverted Pendulum의 최적 제어에 자주 응용되는 LQR 제어의 성능을 비교하여, 본 연구에서 제안한 HFCGA 기반 최적 Fuzzy Cascade 제어기의 우수한 성능을 확인하였다.

시뮬레이션에서 Sampling Time은 0.01[sec]이며 시스템의 초기 값은 Rotating Arm의 각도 (\$\theta\$)는 0[rad], Pendulum의 각도 (\$\alpha\$)는 0.016[rad]으로 설정하였고, Rotating Arm의 각도 (\$\theta\$)의 목표 값은 0[rad]으로 설정하였다.

비교 대상이 되는 LQR(Linear Quadratic Regulator) 제어기는 식 (5)과 같은 상태 공간 모델로 표현한 시스템에서 제어 대상 시스템을 안정화 시키면서 식 (20)의 성능지수 \$J\$를 최소화하는 제어 이득행렬 \$K\$를 구하는 것으로 정의된다. 성능지수의 \$Q, R\$ 행렬은 설계자의 경험이나 시행착오에 의해 보통 구해지며 본 논문에서는 QUANSER사에서 제공한 식 (21)과 같은 행렬을 사용하였다. 구해진 \$K\$ 값은 { 1.826, 1.811, -23.985, -3.399}이다.

$$J = \int_0^{\infty} [x^T(t)Qx(t) + u^TRu(t)]dt \quad (20)$$

$$u(t) = -Kx(t)$$

$$Q = \begin{bmatrix} 5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 20 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad R = [1.5] \quad (21)$$

본 논문에서 사용한 실수코딩 기반 SGA와 HFCGA의 파라미터 및 수행 전략은 표 2와 같다.

단순 유전자 알고리즘과 계층적 공정 경쟁 유전자 알고리즘을 이용하여 동조된 최적 환산계수 및 제어 파라미터는 표 3에 보인다.

그림 6과 표 4는 최적 PD cascade 제어기의 시뮬레이션의 결과를 보인다. 그림 6에서 HFCGA를 이용한 최적 PD cascade 제어기가 SGA 기반 최적 PD Cascade 제어기보다 수렴속도가 빠르고 오버슈트가 작은 반면에 언더슈트는 더 큼을 볼 수 있다.

표 2. SGA와 HFCGA의 파라미터 및 수행 전략.

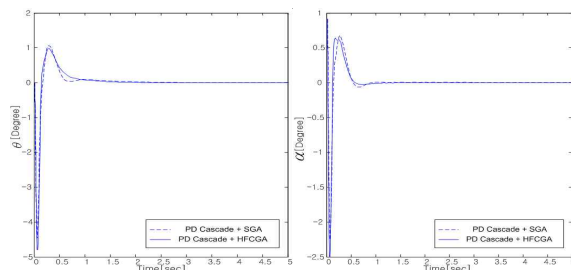
Table 2. Parameters and operators of SGA and HFCGA

	SGA	HFCGA
세대수	100	100
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]
선택연산자	선형 순위 선택	알고리즘
교배연산자	수정된 단순 교배	알고리즘
돌연변이연산자	균일 돌연변이	알고리즘
엘리트전략		사용

표 3. 최적화된 환산계수 및 파라미터.

Table 3. Optimized scaling factors and parameters

		SGA	HFCGA
PD Cascade Controller	Kp1	-11.5412	-7.3118
	Kd1	-2.2035	-1.0638
	Kp2	-4.4623	-8.8101
	Kd2	5.6180	5.652
Fuzzy Cascade Controller	GE1	-10.6712	-10.6057
	GD1	-1.532	-1.4272
	GC1	3.3727	2.6093
	GE2	-2.2753	-4.1864
	GD2	4.7436	7.1448
	GC2	0.7688	0.5699



(a) Rotating arm의 위치 (b) Pendulum의 기울기
그림 6. 최적 PD cascade 제어기의 시뮬레이션 결과
Fig 6. Simulation results of optimized PD cascade controllers

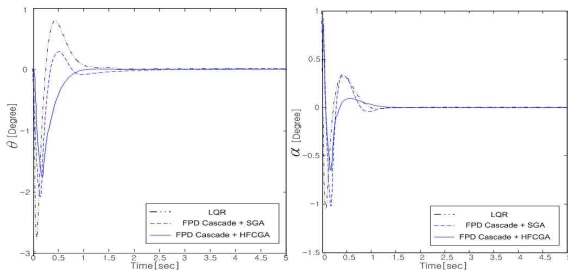
표 4. 시뮬레이션에서의 최적 PD cascade 제어기의 제어 성능 비교

Table 4. Comparison with performance of optimized PD cascade controllers in simulation

PD cascade controller		SGA 적용	HFCGA 적용
Max overshoot (max point)	\$\Theta\$	1.1 °	0.9 °
	\$\alpha\$	0.72 °	0.65 °
Settling time (2%이내)	\$\Theta\$	2.2sec	1.7sec
	\$\alpha\$	1.3sec	1.3sec
정상상태 오차		0	0
목적함수 값(ITAE)		0.3754	0.2597

그림 7과 표 5는 최적 Fuzzy PD cascade 제어기의 시물레이션의 결과를 보인다. 그림 7에서 HFCGA를 이용한 최적 Fuzzy PD cascade 제어기가 SGA 기반 최적 Fuzzy PD cascade 제어기 및 LQR 제어기보다 수렴속도가 빠르고 오버슈트가 작았으며 언더슈트 또한 작음을 볼 수 있다. LQR 제어기와 SGA 기반 최적 Fuzzy PD cascade 제어기의 성능을 비교해 볼 때는 SGA 기반 최적 Fuzzy PD Cascade 제어기의 성능이 더 우수하였다.

그리고 HFCGA를 이용한 최적 PD cascade 제어기와 최적 Fuzzy PD cascade 제어기의 성능을 비교해 볼 때 ITAE의 값, 오버슈트 및 정상상태 도달시간 등 본 연구에서 제안된 HFCGA 기반 최적 Fuzzy PD cascade 제어기의 성능이 가장 우수하였다.



(a) Rotating arm의 위치 (b) Pendulum의 기울기

그림 7. 최적 Fuzzy PD Cascade 제어기의 시물레이션 결과

Fig 7. Simulation results of Optimized fuzzy PD cascade controllers

표 5. 시물레이션에서의 제어 성능 비교

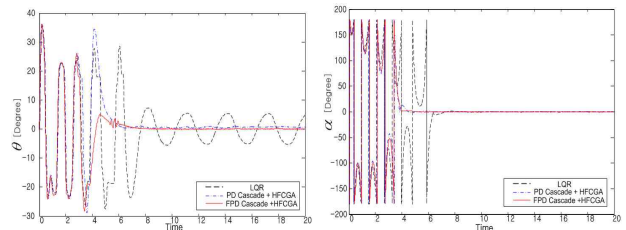
Table 5. Comparison with performance of controller in simulation

Fuzzy PD cascade controller		LQR	SGA 적용	HFCGA 적용
Max overshoot (max point)	Θ	0.8 °	0.3 °	0 °
	α	0.3 °	0.3 °	0.1°
Settling time (2%이내)	Θ	1.6sec	2.4sec	1.1sec
	α	1.4sec	1.4sec	1.4sec
정상상태 오차		0	0	0
ITAE		0.4282	0.2304	0.2026

시물레이션 결과를 통해 SGA 보다 HFCGA의 탐색 능력이 더 우수함을 알 수 있었다. 또한 실제 플랜트에 대하여 LQR 제어기 및 HFCGA 기반 최적 PD Cascade 제어기와 최적 Fuzzy PD cascade 제어기의 성능비교를 수행하였다. 그림 8은 실제 플랜트에 LQR 제어기, 제안된 HFCGA를 이용한 최적 Fuzzy cascade 제어기 및 PD cascade 제어기를 적용한 결과를 보여준다. 실제 플랜트에서는 Pendulum을 -180도(degree)에서 시작하여 Pendulum을 위로 세우기 위한 Swing 동작을 하고, Pendulum의 각도 (α)가 $[1]$ 도(degree)에 도달할 때부터 제어기가 동작하도록 설정하였다. 참고로 실제 플랜트결과에서 초기부분의 큰 진동들은 Pendulum을 위로 세우기 위한 Swing 동작에 대한 출력이다.

Rotating Arm의 위치(θ)에 대하여서는 본 연구에서 제

안된 최적 Fuzzy cascade 제어기 및 PD cascade 제어기는 우수한 성능을 보인 반면 LQR 제어기는 시물레이션 결과와는 다르게 수렴하지 않고 진동하였다. 물론 제안된 최적 Fuzzy cascade 제어기 및 PD cascade 제어기도 목표 값인 0도(degree)에 수렴하지 않고 진동하였지만 그 진동 폭은 $[0.2]$ 도(degree) 정도였다. 그리고 정상상태 도달시간 역시 LQR 제어기 보다 빠름을 알 수 있다. Fuzzy cascade 제어기와 PD cascade 제어기 비교해보면 PD cascade 제어기는 정상상태 오차가 존재하고 오버슈트 역시 Fuzzy cascade 제어기 보다 큰 결과를 보였다.



(a) Rotating arm의 위치 (b) Pendulum의 기울기

그림 8. 실제 플랜트에 대한 실험 결과 및 성능 비교

Fig 8. Experimental results and comparison of performance for real plant

Pendulum의 기울기(α)에 대하여서는 Rotating Arm의 위치에 대한 결과와 마찬가지로 최적 Fuzzy cascade 제어기 및 PD cascade 제어기가 LQR 제어기 보다 정상상태 도달시간이 빨랐고 진동 폭 또한 작았으며, Fuzzy cascade 제어기에서 오버슈트가 가장 작음을 알 수 있다. 시물레이션뿐만 아니라 실제 플랜트에 적용한 결과에서도 본 연구에서 제안된 HFCGA 기반 최적 Fuzzy PD Cascade 제어기의 성능이 보다 우수함을 알 수 있었다.

6. 결 론

본 논문에서는 RIPS의 제어를 위하여 Rotating Arm의 위치(θ)와 Pendulum의 기울기(α)를 동시에 제어하는 Fuzzy cascade 제어구조를 제안하고, HFCGA를 이용한 설계된 Fuzzy cascade 제어기의 제어 파라미터들과 후반부 멤버쉽 함수(Singleton)들을 최적화방법을 제시하였다.

Fuzzy cascade 제어구조에서 외부 루프 제어기로서 Fuzzy PD 제어기를 사용하였으며 내부 루프 제어기로서 측정치 미분 선행형 Fuzzy PD 제어기를 사용하였다.

본 논문에서 제안된 HFCGA를 이용한 최적 Fuzzy cascade 제어기는 시물레이션 및 실제 플랜트에 적용하여 성능의 우수함을 확인하였다.

참 고 문 헌

[1] 오성권, "C 프로그래밍에 의한 퍼지 모델 및 제어 시스템", 내하출판사, 2002.
 [2] C. C. Lee, "Fuzzy Logic in Control Systems: Fuzzy Logic Controller - part I and part II," *IEEE Trans. on Syst., Man Cybern.*, vol. 20, pp.

404-435, 1990.

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

[4] S.-K. Oh, W. Pedrycz, S.-B. Rho and T.-C. Ahn, "Parameter estimation of fuzzy controller and Its application to inverted pendulum" *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 17, Issue 1, February 2004, Pages 37-60.

[5] K. Passino i S. Yurkovich, "*Fuzzy Control*", Addison-Wesley Longman, Ohio 1998.

[6] Razani K. Mudi, Nikhil R. pal "A Robust Self-Tuning Scheme for PI and PD Type Fuzzy Controllers" *IEEE Transactions on Fuzzy systems* Vol.7, No.1, February 1999.

[7] Zhen-yu Zhao, Massayoshi Tomizuka, Satoru Isaka. "Fuzzy Gain Scheduling of PID Controllers" *IEEE Transactions on systems, man and Cybernetic*. Vol 23, No.5. Sep./Oct. 1993.

[8] Li Zheng. " A Practical Guide to Tune of PI Like Fuzzy Controllers." *IEEE*. 1992

[9] Z. Michalewicz, "*Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs*", Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1996.

[10] D. Jong, K. A., "*Are Genetic Algorithms Function Optimizers?*", North-Holland, Amsterdam.

[11] 진강규, "*유전알고리즘과 그 응용*", 교우출판사, 2002

[12] Lin, S.C., Goodman, E., Punch, W. " Coarse-Grain Parallel Genetic Algorithms: Categorization and New Approach," *IEEE Conf on Parallel and Distrib. Processing*. Nov. (1994)

[13] R. Lohmann, " Application of Evolution Strategy in Parallel Populations", *Lecture Notes in Computer Science*, Springer-Verlag, Vol. 496, pp198-208, 1991.

[14] J. Hu, E. Goodman, K. Seo, Z. Fan, R. Rosenberg, " The Hierarchical Fair Competition (HFC) Framework for Continuing Evolutionary Algorithms,". *Evolutionary Computation*, The MIT Press, Vol. 13, Issue 2, pp 241-277, 2005

[15] R. Ortega, M. W. Spong, F. Gomez-Estern, and G. Blankenstein, "Stabilization of a class of under actuated mechanical systems via interconnection and damping assignment," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 47, no. 8, pp. 1218-1233, Aug 2002.

[16] F. Grasser, A. D. Arrigo, S. Colombi, and A. C. Rufer, "JOE: a mobile, inverted pendulum," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 49, no. 1, pp. 107-114, Feb 2002.

[17] D. YU, G. LI, S. WANG AND H. HU, " A Fuzzy Cascade Control for An Inverted Pendulum" *International Journal of Information and Systems Sciences*, vol. 3, no. 4, pp. 663-675, Jan 2007.

저 자 소 개



정승현 (Seung-Hyun Jung)
 2006년 : 수원대 전기전자공학부 졸업.
 2006년~2008 : 동 대학원 전기공학과
 졸(공학석사)
 2008년~현재 : LG전자 연구소

관심분야 : 퍼지추론시스템, 신경회로망, 유전자 알고리즘
 및 최적화이론, 지능시스템 및 제어 등
 Phone : (031) 222-6544
 E-mail : jinhealim@suwon.ac.kr



최정내 (Jeoung-Nae Choi)
 1997년 : 원광대 제어계측과 졸업.
 1999년 : 동 대학원 제어계측과 졸업(공학
 석사).
 2004년 : 동 대학원 전기공학과 졸업(공학
 박사).
 2006년~2007 : 수원대학교 전기공학과
 Post-Doc.

2008년~현재 : 대림대학 전기과 전임강사.
 관심분야 : PID제어, 지능 제어, 최적화 기법, 퍼지이론, 신
 경망 이론 등.
 Phone : (031) 467-4667
 E-mail : jnchoi@daelim.ac.kr



오성권 (Sung-Kwun Oh)
 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 컴퓨터공학
 과 Post-Doc.
 1993~2005년 : 원광대 전기전자 및 정보공학부 교수
 2005년~현재 : 수원대 전기공학과 교수.
 2002년~현재 : 대한전기학회, 퍼지및지능시스템학회 및 제
 어자동화시스템 공학회 편집위원.

관심분야 : 시스템 자동화, 퍼지이론, 신경회로망 응용 및
 제어, 컴퓨터 지능 등.
 Phone : (031) 229-8162.
 E-mail : ohsk@suwon.ac.kr



김현기(Hyun-Ki Kim)

1977년 : 연세대학교 전기공학과 졸업.

1985년 : 동 대학원 전기공학과 졸업
(공학석사).

1991년 : 동 대학원 졸업(공학박사).

1997년 ~ 현재 : 경기지역 산학연 기술지원
단 단장.

1998년 ~ 현재 : 산업기술정책연구소
심의위원.

2000년 ~ 현재 : 사단법인 산학연 컨소시엄 전국협의회 회장.

1989년 ~ 현재 : 수원대학교 전기공학과 교수.

관심분야 : 시스템자동화 및 감시제어, 지능형모델링 및 제
어 등.

Phone : (031) 220-2300

E-mail : hkkim@suwon.ac.kr