

## 계층적 공정 경쟁 유전자 알고리즘을 이용한 회전형 역 진자 시스템의 최적 Fuzzy 제어기 설계

정승현, 최정내, 오성권  
수원대학교 전기공학과

### Design of Optimized Fuzzy Controller for Rotary Inverted Pendulum System Using HFC-based Genetic Algorithms

Seung-Hyun Jung, Jeoung-Nae Choi, Sung-Kwun Oh  
Department of Electrical Engineering, The University of Suwon

**Abstract** - 본 논문은 계층적 공정 경쟁 유전자 알고리즘(Hierarchical Fair Competition-based Genetic Algorithms : HFCGA)을 이용하여 회전형 역 진자 시스템의 최적 Fuzzy 제어기 설계를 제안한다. 탐색 공간이 크거나 복잡한 최적해 탐색문제에 대해 초기 수렴 문제를 내재하고 있는 기존의 유전자 알고리즘의 해결방안으로 병렬 유전자 알고리즘이 개발되었으며, HFCGA는 병렬 유전자 알고리즘의 한 구조이다. 본 논문에서는 회전형 역 진자 시스템에 대해 LQR 제어기와 유사한 형태의 Fuzzy 제어기를 구성하고, HFCGA를 이용하여 최적의 제어기 파라미터들을 구한다. 그리고 시뮬레이션 및 실제 공정에 적용하여 LQR 제어기와 설계된 제어기의 성능을 평가한다.

#### 1. 서 론

회전형 역 진자 시스템(Rotary Inverted Pendulum System : RIPS)은 로봇이나 2족 보행 로봇의 자세제어의 기본이 되는 비선형 시스템의 대표적인 예로서, 동역학적인 구조나 장치가 단순하며 수학적 모델이 잘 알려져 있다.[1] 이러한 회전형 역 진자 시스템에서 제어목적은 Rotating Arm을 원하는 위치에 오게 하고 그 위치에서 진자를 수직 위치의 불안정 평형점에 위치하도록 하는 것이다.

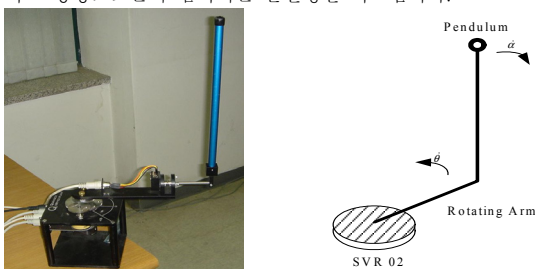
본 논문은 역 진자 시스템에 인간의 지식과 경험을 이용한 지적 제어 방식으로 IF-THEN 형식의 규칙으로부터 제어 입력을 결정하는 병렬형 제어인 Fuzzy 제어기를 구성한다.[2] 퍼지제어기는 PID제어기와 비슷한 형태의 제어 파라미터들을 가지고 있다. 그러나 이 퍼지 제어기의 파라미터들은 수식에 의해 결정될 수 없어서, 시행착오를 거쳐 구하거나 유전자 알고리즘 같은 최적화 알고리즘을 이용하여 구한다. 일반적으로 유전자 알고리즘은 전역 해를 찾을 수 있는 최적화 알고리즘으로 잘 알려져 있으며, 많은 응용에 성공적으로 사용되고 있다. 그렇지만 탐색 공간이 크거나, 파라미터 수가 많은 경우 세대가 증가하여도 더 좋은 최적해를 찾지 못하고 지역해에 빠지는 초기 수렴 문제를 내재하고 있다. 초기 수렴을 억제하고 전역해를 찾기 위한 해결 방안으로써 병렬 유전자 알고리즘이 개발되었으며, 특히 병렬 유전자 알고리즘의 한 구조인 계층적 공정 경쟁 구조(HFCGA)[3-4]는 큰 탐색 공간을 갖는 문제에 효과적이다.

회전형 역 진자 시스템의 Fuzzy 제어를 위해 Rotating Arm의 각도  $\theta$  와 Pendulum의 각도  $\alpha$  를 제어하는 Fuzzy 제어기를 구성하고, 계층적 공정 경쟁 유전자 알고리즘을 이용하여 제어기의 파라미터들을 최적화한다. 그리고 Inverted Pendulum의 최적제어에 자주 응용되는 LQR(Linear Quadratic Regulator) 제어와 시뮬레이션 및 실제 플랜트에 적용한 결과를 비교한다.

#### 2. 회전형 역 진자 시스템 및 Fuzzy 제어기 설계

##### 2.1 회전형 역 진자 시스템(RIPS)

Rotating Arm, Pendulum, Potentiometer, SVR 모터로 이루어지고, 진자의 운동은 연직상에서 불안정한 상태가 되므로 제어력이 가해지지 않으면 어느 방향으로든지 넘어지는 불안정한 시스템이다.



<그림 1> 회전형 역 진자 시스템의 구성 및 동작

회전형 역 진자 시스템의 전체적인 구성과 동작은 그림 1과 같고, 모터의 구동이 Rotating Arm의 원운동으로 연결되어 Pendulum을 제어하도록 되어있다. Rotating Arm의 각도( $\theta$ )는 회전축을 기준으로 왼쪽으로 기울어진 방향을 +방향으로, Pendulum의 각도( $\alpha$ )는 수직축으로부터 기울어진 경사각이라 정의하고 오른쪽으로 기울어진 방향을 +방향으로 하였다. 그리고 Euler-Lagrange 방정식과 Lagrangian 방정식을 이용하여 모델링을 하고, Pendulum의 각( $\alpha$ )을 아주 작다고 가정하여 선형화하면 최종 식은 다음과 같다.

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

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

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

식 (1)~(3)을 이용하여 상태방정식을 만들면 다음과 같다.

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

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

$$E = ac - b^2,$$

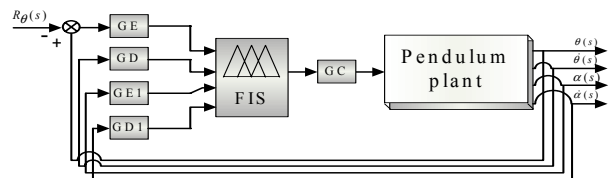
$$G = \frac{n_m n_g K_t K_m K_g^2 + B_{eq} R_m}{R_m}$$

수식을 대입하여 다시 정리하면 다음과 같다.

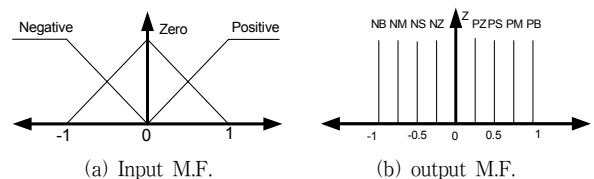
$$\begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{\alpha} \\ \ddot{\theta} \\ \ddot{\alpha} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 33.2953 & -16.7347 & 0 \\ 0 & 67.4805 & -11.8392 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ \alpha \\ \dot{\theta} \\ \dot{\alpha} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix}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

##### 2.2 Fuzzy 제어기 설계

본 논문에서 설계한 Fuzzy 제어기의 구조는 그림 2와 같고, 각각의 멤버십 함수는 그림 3과 같다. Rotating Arm의 각도( $\theta$ )와 Pendulum의 각도( $\alpha$ )를 제어하기 위해 4입력 1출력의 Fuzzy 제어기를 구성하고, 각각의 제어기 파라미터(GE, GD, GE1, GD1, GC)는 다음 장에서 설명하는 계층적 공정 유전자 알고리즘을 이용하여 최적화한다.



<그림 2> Fuzzy 제어기 구조



(a) Input M.F.

(b) output M.F.

<그림 3> Membership Function

4개의 입력 멤버십 함수는 모두 동일하고, 후반부 멤버십 함수는 간략 추론을 사용하였다. Fuzzy 제어의 규칙은 다음과 같고, 총 81개의 규칙을 사용하였다.

If  $\theta$  is Negative and  $\dot{\theta}$  is Negative and  $\alpha$  is Negative and  $\dot{\alpha}$  is Negative, THEN  $U$  is NB.

\*NB = -1, NM = -0.75, NS = -0.5, NZ = -0.25, Z = 0, PZ = 0.25  
PS = 0.5, PM = 0.75, PB = 1

### 3. 계층적 공정 경쟁 알고리즘을 이용한 제어기의 최적화

여러 개의 집단을 사용하여 집단 간의 개체가 이주하는 구조를 갖는 병렬 유전자 알고리즘(PGA)[3]이 많이 연구되고 있다. PGA에는 이주 과정에 따라 완전네트구조, 링구조, 이웃이주구조 그리고 본 연구에서 사용한 계층적 경쟁 방법(Hierarchical Fair Competition : HFC)을 도입한 HFCGA[4]가 있다. 이 방법은 사회적 교육 시스템에서 동등 수준을 가진 그룹으로 나누어 학습에 대한 경쟁을 하며, 우수한 인체는 상위 그룹으로 진급하는 체계를 병렬 유전자 알고리즘에 적용한 것으로써, 유전자 알고리즘의 수행과정에서 각 개체들을 적합도별로 나누어 경쟁을 시킴으로써 공평한 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. 이와 같은 원리를 통해서 항상 아래 수준의 집단으로부터 높은 수준의 개체가 올라올 수 있는 통로를 만들어 놓음으로써, 조기 수렴을 최대로 방지할 수 있다.

HFCGA는 여러 개의 집단이 계층적으로 구성되어있으며, 각 집단은 특정 범위의 적합도를 갖는 개체들로 구성되어 있으며, 하위 수준의 집단으로부터 개체의 진입을 위한 문턱적합도를 갖고 있다. 그리고 진화과정은 기존의 유전자 알고리즘과 비슷하지만 이주과정이 있다는 것이 다른 점이다. HFCGA에서 이주과정은 정해진 일정한 세대 간격마다 수행하게 된다. 이주과정의 단계는 다음과 같다.

[Step 1] 각각의 집단 개체들의 적합도를 정규화한다.

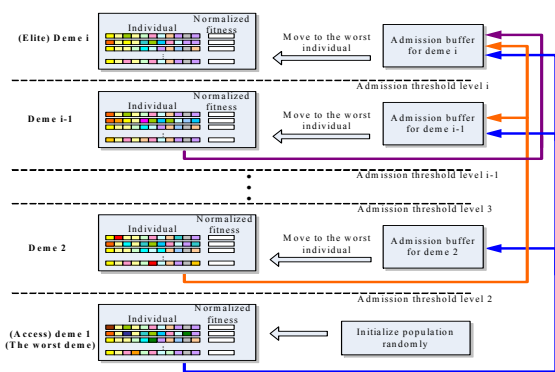
$$nf_{j,i} = f_{j,i}/f_{\max} \quad (4)$$

$f_{j,i}$ 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 4> HFCGA의 이주 구조

각 집단은 독립적으로 진화하게 되며 진화과정 중 우수한 개체는 자기 수준에 맞는 상위 집단으로 이주하게 된다. 그림 4은 HFCGA의 이주 구조를 보여주며 화살표는 개체들의 이동 가능한 방향을 의미한다.

본 논문에서 사용된 HFCGA는 실수형 GAs를 기반으로 하였으며 선형 순위 선택알고리즘, 수정된 단순교배 알고리즘, 균일 돌연변이 알고리즘 및 엘리트 전략을 사용하였다. 그리고 전체 세대수의 10%마다 이주 과정을 수행하였다. 유전자 알고리즘에서 목적함수를 평가하기 위해 성능 지수로서 ITAE를 사용하였으며, 식 6과 같이 각 플랜트 출력의 ITAE 합을 목적함수 값( $f$ )으로 사용하였다.

$$ITAE = \int t|E(t)|dt \quad (5)$$

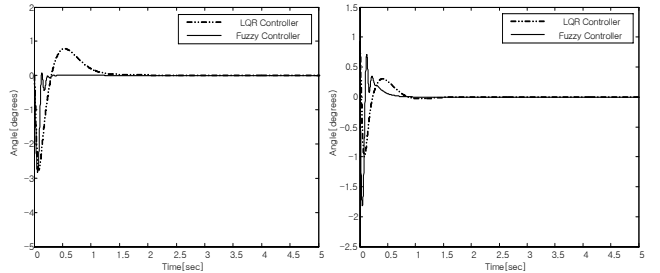
$$f = ITAE_{Theta} + ITAE_{alpha} \quad (6)$$

### 4. 시뮬레이션 및 결과고찰

본 논문에서는 회전형 역진자 시스템을 Fuzzy 제어기를 구성하여 제어하였으며, Inverted Pendulum의 최적제어에 자주 응용되는 LQR 제어와 비교하여 그 성능을 평가한다.

$$J = \int (x^T Q x + u^T R u) dt, u = -Kx \quad (7)$$

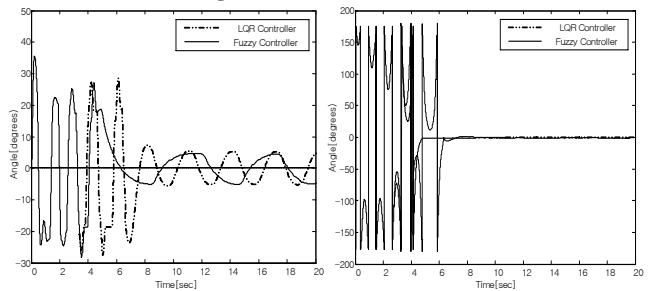
비교 대상이 되는 LQR제어기는 식 7과 같은 성능지수  $J$ 를 최소화하는 제어 이득행렬  $K$ 를 구하는 것으로 정의된다. 성능지수의 Q, R 행렬은 설계자의 경험이나 시행착오에 의해 보통 구해지며 본 논문에서는 QUANSER사에서 제공한 행렬을 사용하였다.



(a)  $\theta$  시뮬레이션 결과 (b)  $\alpha$  시뮬레이션 결과

<그림 5> 시뮬레이션 결과

그림 5의 시뮬레이션 결과를 보면 Fuzzy 제어기가 LQR 제어기보다 오버슈트는 크지만 수렴속도가 빠름을 볼 수 있다. 그리고 아래 그림 6의 실제 플랜트에 적용하였을 때 역시, HFCGA로 최적화된 Fuzzy 제어기가 수렴속도가 빠르고, LQR 제어기와 비슷한 성능을 가짐을 알 수 있다. 참고로 실제 플랜트결과에서 초기부분의 큰 진동들은 Pendulum을 위로 세우기 위한 Swing 동작이다.



(a)  $\theta$  플랜트 결과 (b)  $\alpha$  플랜트 결과

<그림 6> 실제 플랜트 결과

### 5. 결론

본 논문에서는 비선형이며 불안정한 시스템 회전형 역진자 시스템의 제어를 위해 Fuzzy 제어기를 구성하고, 제어기에서 중요한 비중을 차지하는 파라미터를 HFCGA를 이용하여 최적화하였다. 그리고 시뮬레이션 및 실제 플랜트에 적용한 결과를 보면 알 수 있듯이 원하는 성능을 얻었음을 확인하였다.

본 논문에서 사용한 계층적 공정 경쟁 유전자 알고리즘은 더욱 복잡한 최적해 탐색문제에 대해 우수한 성능을 얻을 수 있을 것이다.

### 감사의 글

이 논문은 2006년도 교육인적자원부의 재원으로 한국학술진흥재단(KRF-2006-311-D00194)의 지원을 받아 수행된 연구임

### [참고 문헌]

[1] R. Ortega, M. W. Spong, F. Gomez-Estern, and G. Blankenstein, "Stabilization of a class of underactuated mechanical systems via interconnection and damping assignment," IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 47, no. 8, pp. 1218-1233, Aug 2002.  
[2] S.-K. Oh, "Fuzzy Model & Control System by C-Programming", Naeha Publishing Co., 2002.  
[3] K.-K. Jin, "Genetic Algorithms and Their Applications", KyoWoo Press, 2002  
[4] 최정내, 오성권 "적응형 계층적 공정 경쟁 유전자 알고리즘을 이용한 정보입자 기반 퍼지집합 퍼지모델의 최적화", Proceedings of KFIS Autumn Conference 2006. 16, No. 2, 2006.