

## 도립진자의 각도 및 위치제어를 위한 적응진화연산을 이용한 퍼지-PD제어기 설계

손원국\*, 김형수\*, 문경준\*, 황기현\*, 박준호\*\*

\*부산대학교 전기공학과, \*\*부산대학교 전기공학과 교수

### Design of Fuzzy-PD controller for Inverted Pendulum Using Adaptive Evolutionary Computation

W. K. Son, Hyung-Su Kim, Kyeong-Jun Mun, Gi-Hyun Hwang, J. H. Park

Department of Electrical Engineering, Pusan National University

**Abstract** - In this paper, fuzzy-PD control system is designed to control angle and position of the inverted pendulum. To optimize parameters of fuzzy-PD controller, we used adaptive evolutionary computation(AEC). AEC uses a Genetic Algorithm(GA) and an Evolution Strategy(ES) in an adaptive manner in order to take merits of two different evolutionary computations.

#### 1. 서 론

도립진자 시스템의 제어기 설계에 있어서 진자의 각도만을 제어하는 경우와 진자의 각도와 위치를 동시에 제어하는 경우에 따라 제어기의 설계가 달라진다. 도립진자의 각도만을 제어하는 경우에는 비례-미분-적분(proportional integral derivative : PID)제어기와 인간의 의사결정을 모의한 퍼지 제어기(fuzzy logic controller) 등의 제어기법을 이용하여 좋은 제어성능을 얻고 있다[1,2]. 그러나 도립진자의 각도와 위치를 동시에 제어할 경우에는 도립진자의 각도만 제어할 경우와 같이 간단하게 제어기법을 설계할 수 없다. 최근에는 이러한 도립진자의 각도와 위치를 동시에 제어하기 위해 인간의 두뇌 구조를 모의한 인지적 정보 처리구조를 갖는 신경회로망 제어기(neurocontroller)와 같은 지능제어 이론을 비선형 시스템에 적용하여 좋은 제어성능을 얻고 있다[3]. 따라서, 본 논문에서는 도립진자의 각도와 위치 제어시 퍼지-PD제어기를 사용하였다. 퍼지 제어기가 좋은 제어성능을 가지도록 하려면 퍼지 제어기에 사용되는 퍼지 규칙과 퍼지 변수의 소속함수 모양, 입·출력 이득을 결정해야 한다. 그리고 PD제어기도 좋은 제어성능을 얻기 위해서는 최적의 PD제어기 이득을 결정하여야 한다. 종래에는 전문가의 지식과 경험 및 시행착오법에 의한 최적제어 기법을 이용하여 퍼지 제어기 및 PD제어기를 설계하였지만 이는 시간과 노력이 많이 요구되며 원하는 제어 성능을 얻기도 어렵다. 최근에는 자연의 진화를 모의한 확률적인 최적화 탐색 알고리즘인 진화연산(evolutionary computation : EC)을 이용하여 퍼지 제어기의 퍼지 규칙, 소속함수 모양, 입·출력 이득과 PD제어기의 이득을 최적화 시키는 방법이 많이 제안되고 있다[4,5].

본 논문에서는 기존 진화연산의 문제점을 개선하여 최적해를 빠른 시간 내에 정확하게 찾기 위한 알고리즘으로써 유전알고리즘의 전역 탐색능력과 진화전략의 국부 탐색능력을 적용적으로 이용한 알고리즘인 적응진화연산을 이용하여 퍼지 제어기의 퍼지 규칙 및 소속함수 모양, 입·출력 이득과 PD제어기의 이득을 최적화하였고, 제안한 제어기의 성능을 검증하기 위해 도립진자의 각도 및 위치제어에 적용하였다.

#### 2. 적응진화연산

본 논문에서 제안한 적응진화연산은 해집단을 다음 세대로 진화시킬 때, 유전알고리즘과 진화전략을 동시에 사용하고, 적합도에 따라 복제하는 과정에서 유전알고리즘과 진화전략이 적용될 해집단의 비율이 적응적으로 변경되는 알고리즘이다. 적응진화연산의 주요과정은 개체의 구분(초기화), 평가 및 복제, 최소 해집단 보장, 유전알고리즘과 진화전략의 연산, 엘리티즘으로 구성되어 있으며 각각의 특성은 아래와 같다.

1. 개체의 구분(초기화) : 주어진 문제의 제약조건을 고려하여 임의로 각 스트링을 생성하여 초기 해집단을 구성할 때 각 스트링에 대해서 태그변수 0 또는 1을 임의로 대용시킨다. 태그변수 0은 유전알고리즘을 적용할 개체이고 태그변수 1은 진화전략을 적용할 개체이다.

2. 평가 및 복제 : 각 스트링을 평가하기 위해서 적합도 함수는 목적 함수가 최소가 되면 적합도가 최대가 되도록 선정하였다. 복제 방법은 적합도에 비례하여 복제하는 루울렛 훈을 사용하였다. 복제 후 태그변수가 0인 개체들은 유전알고리즘의 교배 및 돌연변이 과정을 적용하여 자손을 생성하고 그 자손에는 태그변수 0을 대용시킨다. 그리고 태그변수가 1인 개체들은 진화전략을 적용하여 자손을 생성하고 그 자손에는 태그변수 1을 대용시킨다.

3. 최소해집단 수의 보장 : 세대가 진행됨에 따라 어떤 경우에는 유전알고리즘 혹은 진화전략 중 어느 하나의 역할이 너무 커져서 다른 하나의 방법에 의한 자손은 소멸될 수 있다. 이를 방지하기 위하여 유전알고리즘과 진화전략의 해집단은 전체 해집단에 대해 일정비율 이상의 개체를 유지시키도록 하였다.

4. 유전알고리즘과 진화전략의 연산 : 실행시간이 단축되고 수학적 기법이 첨가될 수 있는 실 변수형 유전알고리즘을 이용하였으며, 복제 방법으로는 루울렛 훈, 교배 및 돌연변이 방법으로는 단순 교배와 균등 돌연변이를 사용하였다. 진화전략은 부모 해집단으로부터 자손 해집단을 생성한 후 부모는 모두 제거하고 자손 해집단을 다음 세대의 부모 해집단으로 선택하는 방법을 사용하였다.

5. 엘리티즘 : 전체 해집단에서 적합도가 가장 높은 개체를 유전알고리즘의 해집단과 진화전략의 해집단에 각각 하나씩 복제하였다. 이때 유전알고리즘의 해집단에 대해서는 태그변수를 0으로, 진화전략의 해집단에 대해서는 태그변수를 1로 두었다.

#### 3. 적응진화연산을 이용한 퍼지-PD제어기의 설계

적응진화연산을 이용한 도립진자의 각도 및 위치 PD제어기의 이득과 퍼지 제어기의 퍼지 규칙 및 퍼지 변수의 소속함수 모양과 스케일링 상수를 동시에 동조하기

위한 퍼지-PD제어기의 구성은 그림 1과 같다. 그림 1에서 보는 바와 같이 도립진자의 각도와 위치를 제어하기 위한 각각의 PD제어기를 구성하였고, 각 PD제어기 출력값의 비선형적 관계를 고려하여, 퍼지 제어기의 입력으로 각도 및 위치 PD제어기 각각의 출력을 사용하였다. 그리고 적용진화연산을 이용하여 각 PD제어기 이득과 퍼지 제어기의 퍼지 규칙, 소속함수, 스케일링 상수를 최적화 하였다.

퍼지 제어기의 입·출력 변수는 각각 7개의 퍼지 변수를 사용하였으므로 퍼지 변수의 소속함수 수는 총 21개이고, 퍼지 규칙은 총 49개이다. 따라서 그림 2에서 보는 바와 같이 삼각형 소속함수의 꼭지점( $P_i$ )과 폭( $W_i$ )을 동조하려면 총 63개의 퍼지 변수가 필요하지만, 본 논문에서는 제로 소속함수에 대해 소속함수를 대칭으로 구성하였기 때문에 동조해야 할 소속함수의 꼭지점과 폭의 수는 21개이다. 그리고, 그림 3에서 보는 바와 같이 스위칭 라인에 대해서 대칭의 퍼지규칙을 사용하였기 때문에 동조해야 할 퍼지 규칙의 수는 21개이다. 따라서, 적용진화연산으로 동조할 파라메터의 수는 각도 및 위치PD 제어기의 이득( $K_{p_\theta}, K_{d_\theta}$ ), ( $K_{p_x}, K_{d_x}$ ) 4개와 퍼지 제어기의 퍼지 규칙, 소속함수 및 스케일링 상수를 포함해서 47개이다. 그림 4는 퍼지-PD제어기를 동조하기 위한 적용진화연산의 해집단 구조를 나타내었다. 그리고 각 스트리밍을 평가하기 위해 사용된 적합도 함수는 식 (1)과 같다.

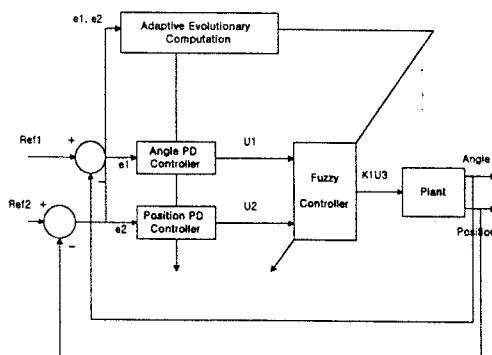


그림 1 적용진화연산을 이용한 퍼지-PD 제어기

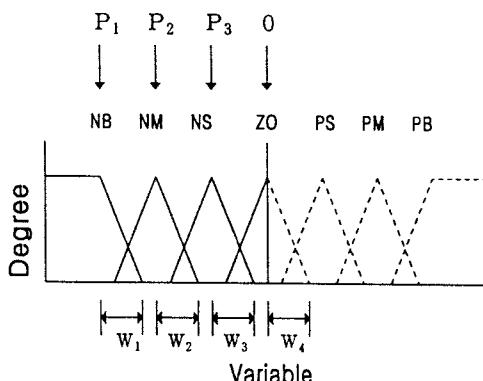


그림 2 대칭형의 소속함수

오차변화율(de)						
	NB	NM	NE	ZE	PO	PE
NB	NB	NB	NM	NM	NS	PS
NM	NB	NB	NM	NM	NS	PS
NE	NB	NM	NM	NS		PM
ZE	NM	NM	NS		PS	PM
PO	NM	NS		PS	PM	PM
PE	NS		PS	PM	PM	PB
		PS	PM	PM	PB	PB
		PS	PM	PM	PB	PB

스위칭  
라인

오차(e)  
제어신호(u)

그림 3 퍼지 규칙

String (1)	$K_{p_\theta}$	$K_{p_x}$	$K_{d_\theta}$	$K_{d_x}$	$R_{11}$	$\dots$	$R_{1n}$	$F_{11}$	$\dots$	$F_{1n}$	$W_{11}$	$\dots$	$W_{1n}$	$K_{\theta}$
String (2)	$K_{p_\theta}$	$K_{p_x}$	$K_{d_\theta}$	$K_{d_x}$	$R_{21}$	$\dots$	$R_{2n}$	$F_{21}$	$\dots$	$F_{2n}$	$W_{21}$	$\dots$	$W_{2n}$	$K_{\theta}$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
String (n)	$K_{p_\theta}$	$K_{p_x}$	$K_{d_\theta}$	$K_{d_x}$	$R_{n1}$	$\dots$	$R_{nn}$	$F_{n1}$	$\dots$	$F_{nn}$	$W_{n1}$	$\dots$	$W_{nn}$	$K_{\theta}$
	PD제어기 이득				퍼지규칙				소속함수의 밀연길이의 1/2				스케일링 상수	

그림 4 적용 진화연산의 해집단 구조

$$\text{Fitness} = \frac{\alpha}{\beta + \sum_{k=1}^N (|E_{\theta}| + |E_x|)} \quad (1)$$

여기서,  $|E_\theta|$  : 기준 각도와 실제각도의 절대치 오차  
 $|E_x|$  : 기준 위치와 실제위치의 절대치 오차  
 $N$  : T시간 동안 취득한 데이터 수  
 $\alpha, \beta$  : 상수

### 3. 사례 연구

제안한 방법에 대한 성능을 검토하기 위해서, 각도 및 위치 제어에 적용하였다. 도립진자 시스템은 비선형 시스템의 전형적인 예로서 제어 이론의 성능을 검증하기 위하여 많이 사용되고 있다. 그림 5는 도립진자 시스템을 나타내고, 식 (2)는 도립진자 시스템의 운동방정식을 나타낸다.

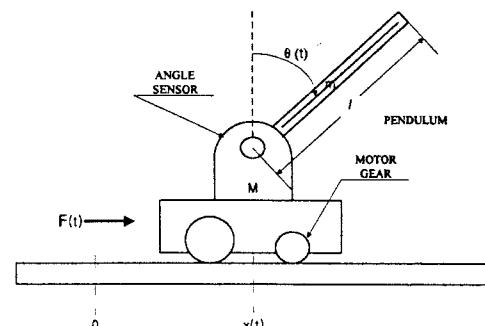


그림 5 도립진자 시스템

$$\begin{aligned}\theta_1 &= \theta_2 \\ \theta_2 &= \frac{g \sin \theta_1 + \cos \theta_1 \left( \frac{-F - mb^2 \sin \theta_1}{M+m} \right)}{\left( \frac{4}{3} \right) l - \left( \frac{ml \cos^2 \theta_1}{M+mb} \right)} \quad (2) \\ \theta_3 &= \theta_4 \\ \theta_4 &= \frac{F + ml(b^2 \sin \theta_1) - \theta_2 \cos \theta_1}{M+m}\end{aligned}$$

$F$  : 수레에 가해지는 힘 (Newton)

$M$  : 수레의 질량 (1.0Kg)

$m$  : 전자의 질량 (0.1Kg)

$l$  : 전자 길이의 반 (0.5m)

$\theta_1$  : 전자의 각도 (degree)

$\theta_2$  : 전자의 각속도 (degree/sec)

$\theta_3$  : 수레의 거리 (cm)

$\theta_4$  : 수레의 속도 (cm/sec)

표 1 적응진화연산의 시뮬레이션 계수

계수 방법	해집단 개수	교배 확률	돌연변이 확률	세대수
AEC	50	0.3	0.1	100

본 논문에서 사용한 적응진화연산의 시뮬레이션 계수 표 1과 같고, 동조에 사용된 각도와 위치의 초기조건은  $2^\circ$  와 50cm이다. 그림 6은 동조된 퍼지-PD제어기에 의해서 제어된 각도와 위치의 변화를 나타내었다. 그림 6에서 보는 바와 같이 제안한 방법이 좋은 제어성능을 나타낸음을 알 수 있다.

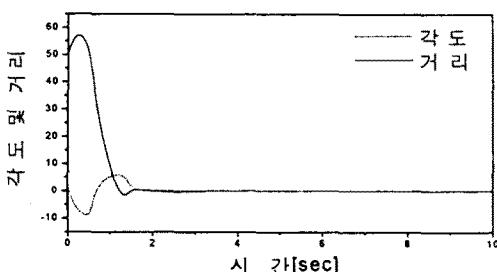


그림 6 초기조건에 대한 응답

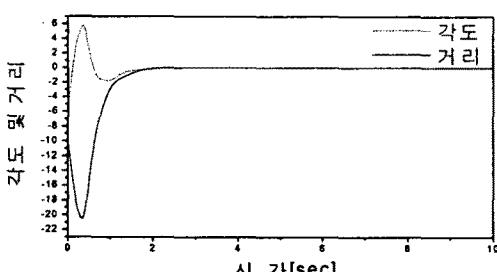


그림 7 새로운 초기조건에 대한 응답

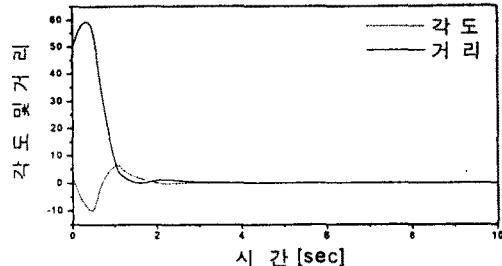


그림 8 전자길이 변화에 대한 응답

제안한 제어기의 강인성을 평가하기 위해서 동조에 사용되지 않은 새로운 초기조건 ( $-5^\circ$ ,  $-10\text{cm}$ )과 전자의 길이를 변화시킨 경우 ( $50\text{cm} \rightarrow 60\text{cm}$ )에 대한 시뮬레이션 결과로 그림 7과 그림 8에 나타내었다. 그림 7과 그림 8에서 보는 것처럼 제안된 제어기가 새로운 초기조건과 전자의 길이변화에 대해서도 강인한 성능을 나타내었다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 해집단을 다음 세대로 진화시킬 때, 유전알고리즘과 진화전략을 동시에 사용하고, 적합도에 따라 복제하는 과정에서 유전알고리즘과 진화전략이 적용될 해집단의 비율이 적응적으로 변경되는 적응진화연산을 제안하였다. 제안된 적응진화연산을 이용하여 퍼지-PD제어기를 설계하여 도립진자의 각도 및 위치제어에 적용하였다. 적응진화연산을 이용하여 각도 및 위치 PD제어기의 이득과 퍼지 제어기의 스케일링 상수 및 퍼지 규칙과 퍼지 소속함수를 최적화 하였다.

본 논문에서는 제안한 적응진화연산을 이용한 퍼지-PD제어기의 성능을 평가하기 위하여 도립진자의 각도 및 위치제어에 적용해본 결과, 제안된 퍼지-PD제어기는 좋은 제어성능을 나타내었고 강인성을 평가하기 위해서 동조에 사용되지 않은 초기 조건과 전자의 길이 변화에 대해서도 퍼지-PD제어기는 강인한 제어성능을 나타냄을 알 수 있었다.

#### (참 고 문 헌)

- [1] K.C.Jeong, Soon H.Kwon, D.H.Lee, M.W.Lee, J.Y.Choi, "A Fuzzy Logic-Based Gain Tuner for PID Controllers". WCCI 98, FUZZ-IEEE, pp.551-554, 1998.
- [2] S.K.Tso, Y.H.Fung, "Fuzzy Implementation of Real-time Control of Inverted Pendulum". Proceedings of the 2nd Asian Control Conference, Vol.2, pp.67-70, 1997.
- [3] Alen Varsek, Tanja Urbancic, Bogdan Filipic, "Genetic Algorithms in Controller Design and Tuning", IEEE Trans on Sys, Man, And Cybernetics, Vol 23, No5, pp.1330-1339, 1993
- [4] Zbigniew Michalewicz, "Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution programs", Springer-Verlag, 1994.
- [5] K.Krishnakumar, D.E.Goldberg, "Control System Optimization Using Genetic Algorithms", Journal of Guidance, Control, and Dynamics, Vol.15, no.3, pp.735-740, 1992.
- [6] 황기현, 문경준, 박준호, 정정원, "진화전략과 유전알고리즘을 이용한 적응진화연산", 대한전기학회 논문지, 262-1268, 1998.8