

# 유전알고리즘에 의한 최적 퍼지 제어기의 설계와 도립진자 시스템의 안정화 제어

°박정훈\*, 김태우\*, 임영도\*\*, 소명옥\*\*\*, 이준탁\*

\* 동아대학교 전기공학과 \*\* 동아대학교 전자공학과 \*\*\* 한국 해양대학교 기관학과  
부산시 사하구 하단2동 840 (Tel (051)200-7740), email:jtlee@seunghak.donga.ac.kr

## Design of Genetic Algorithms Based Optimal Fuzzy Controller and Stabilization Control of the Inverted Pendulum System

Park Jung Hoon, Kim Tae Woo, Im Young Do, So Myung Ok, Lee Joon Tark

\* Dong-A University Electrical Engineering \*\* Dong-A University Electronics Engineering  
\*\*\* Korea Marine Univ.

Dept. of Electrical Eng. Dong-A University, Pusan, Korea,

### Abstract

In this paper, we proposed an optimization method of the membership functions and the numbers of fuzzy rule base for the stabilization controller of the inverted pendulum system by genetic algorithm(GAs). Conventional methods to these problems need to an expert knowledge or human experience. The proposed genetic algorithm method will tune automatically the input-output membership parameters and will optimize their rule-base.

### I. 서론

본 논문에서는, 비선형성이 강한 도립진자 시스템의 안정화 제어기 설계를 위해, 퍼지 제어 규칙수와 규칙의 전건부 및 후건부의 파라미터를 최적화 시키기 위해 유전알고리즘을 적용하고자 한다. 이 퍼지 제어 규칙 및 퍼지 변수의 소속함수 모양을 조정하는데 있어 전문가의 경험과 지식, 혹은 시행착오법에 바탕을 둔 종래의 퍼지 제어기 설계법과는 달리, 본 논문에서는 확률적 최적화 방법인 유전알고리즘을 이용하여 퍼지규칙 및 퍼지변수의 소속함수 파라미터를 자동으로 동정하게 된다.

또한 제안된 알고리즘을 도립진자 시스템의 안정화 제어에 적용함으로써 종래의 제어기법에 비해 성능의 향상 및 개선된 결과를 보이고자 한다.

### II. 도립진자 시스템의 수학적 모델링

그림 1 에 일반적인 도립진자 시스템을 나타내었다. 이 도립진자 시스템의 운동차 및 진자의 운동방정식은 다음과 같이 나타낸다.

$$\text{운동차 : } M\ddot{x}(t) + \mu\dot{x}(t) = \alpha \cdot u(t) - H(t) \quad (1)$$

진자의 수평방향:

$$\begin{aligned} H(t) &= m \frac{d^2}{dt^2} \{x(t) + L \sin \phi(t)\} \\ &= m\ddot{x}(t) + mL\{\ddot{\phi}(t) \cos \phi(t) - \dot{\phi}^2(t) \sin \phi(t)\} \quad (2) \end{aligned}$$

$$\text{수직방향: } V(t) - mg = m \frac{d^2}{dt^2} \{L \cos \phi(t)\}$$

$$= -mL\{\ddot{\phi}(t) \sin \phi(t) + \dot{\phi}^2(t) \cos \phi(t)\} \quad (3)$$

회전방향:

$$J_p \ddot{\phi}(t) = LV(t) \sin \phi(t) - LH(t) \cos \phi(t) - \eta \dot{\phi}(t)$$

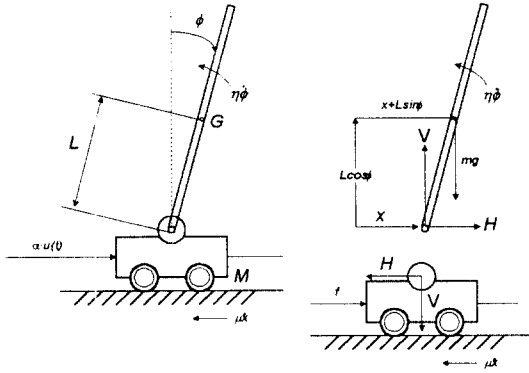


Fig 1. Mathematical modeling of the inverted pendulum system

각 변수들에 대한 정의와 그 값들은 표 1과 같다.

Table 1. Parameters of the inverted pendulum system

	DESCRIPTION	VALUE	UNIT
$m$	Mass of the pendulum	0.112	kg
$L$	Length from the pivot to the mass center of pendulum	0.255	m
$V$	Vertical reaction force at the pivot	—	kg·m/s <sup>2</sup>
$H$	Horizontal reaction force at the pivot	—	kg·m/s <sup>2</sup>
$J_p$	Inertia moment of the pendulum	0.00292	kg
$M$	Mass of the cart	0.886	kg
$x$	Horizontal position of the cart	-0.655 ~0.655	m
$\phi$	Angle of the pendulum from the vertical line	$-\pi \sim \pi$	rad
$r$	Wire belt pulley radius	0.0235	m
$a$	Driving force coefficient	0.738	kg·m/s <sup>2</sup> /v
$u$	Input voltage to push the cart	-10~10	v
$G$	Mass center of the pendulum	—	—
$g$	Gravitational acceleration constant	9.8	m/s <sup>2</sup>
$\mu$	Friction coefficient	2.215	kg/s
$\gamma$	Coefficient related to rotation moment of the pendulum	0.00199	kg·m <sup>2</sup> /s

### III. 적응 퍼지 제어기

도립 진자 시스템을 제어하기 위해서는 2가지의 출력 요소인 운송차의 위치  $x$ [m]와 진자의 각도  $\phi$ [rad]를 고려하여야 한다. 먼저, 초기 상태에 아래로 늘어뜨려져 고유 안정 평형점에 위치하고 있는 진자를 불안정 평형

점 주위의 안정화 영역으로 회전시키기 위한 상선화 제어를 행하게 되는데, 이 경우 bang-bang 타입의 전압이 인가된다.

안정화 제어는 두 부분으로 나뉘게 된다. 먼저, 넘어져 있는 진자를 바로 세우는 제어를 행하는 경우를 고찰한다. 이를 위하여, 진자가 넘어져 있는 각도  $\phi$  와 진자가 넘어지는 속도  $\dot{\phi}$  를 고려하여 제어입력  $u$  를 결정한다. 표 2에 각도 및 각도의 변화량에 대한 전체 25개의 제어규칙이 나타나 있다.

Table 2. Fuzzy control rules for the inverted pendulum

$\phi$ \ $\dot{\phi}$	NB	NM	ZO	PM	PB
NB	NG	NB	NM	NS	ZO
NM	NB	NM	NS	ZO	PS
ZO	NM	NS	ZO	PS	PM
PM	NS	ZO	PS	PM	PB
PB	ZO	PS	PM	PB	PG

단,

NG Negative Great      PS Positive Small  
 NB Negative Big        PM Positive Midium  
 NM Negative Medium    PB Positive Big  
 NS Negative Small      PG Positive Great  
 ZO Approximately Zero

이다.

그림 2에서는 진자의 각도  $\phi$  및 각도의 변화량  $\dot{\phi}$  와 출력변수인 제어입력  $u$  에 대한 소속함수를 각각 나타내고 있다.

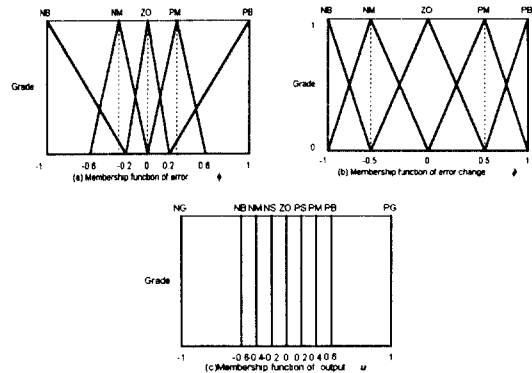


Fig 2. Membership function for the inverted pendulum.

두 번째로, 운송차가 레일의 영역 중의 임의의 위치에 있는 경우, 레일의 한가운데로 운송차를 이동시키는 제어를 행한다. 표 3에 운송차의 위치  $x$  및 위치 변화

량  $x$  의 소속함수와 가상 평형점에 대한 퍼지 제어 규칙표와 그림 3에 소속함수가 나타나 있다.

Table 3. Fuzzy control rules for the virtual equilibrium point  $\psi_{VEq}$

point $\psi_{VEq}$		$x$		
		NB	ZO	PB
$x$	NB	NS	NB	ZO
	ZO	NS	ZO	PS
	PB	ZO	PB	PS

단,

NB Negative Big                      PS Positive Small  
 NS Negative Small                  PB Positive Big  
 ZO Approximately Zero

이다.

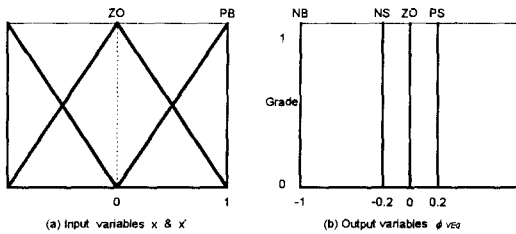


Fig 3. Membership function for the virtual equilibrium point  $\psi_{VEq}$

#### IV 유전알고리즘을 이용한 멤버쉽함수의 튜닝

퍼지 추론 시스템에서 가장 어려운 점은 제어규칙과 멤버쉽 함수를 구성하는 것이다. 도립진자 시스템과 같은 비선형 다변수 특성을 갖는 시스템의 규칙을 단순히 전문가의 경험적 지식이나 실험에 의해 구성하는 일은 상당히 주관적이고 경험에 의존하기 때문에 최적의 성능을 갖는 제어규칙이라고 보기 어렵다. 본 논문에서는 제어규칙과 멤버쉽 함수를 유전알고리즘의 문자열로 변환하여 학습을 통한 최적의 퍼지제어 도립진자 시스템을 구성하고자 한다.

일반적으로 다루게 되는 퍼지모델의 각 규칙은 식 (1)과 같이 나타낸다.

$$i \text{ th Rule : if } x_1 \text{ is } A_{i1} \text{ and } x_2 \text{ is } A_{i2} \text{ then } u \text{ is } Z_i \quad (1)$$

( $i=1, \dots, n$ )

유전 알고리즘에 의하여 입력부 변수  $x_1$  과  $x_2$  그리

고 출력부 변수  $u$  에 대한 멤버쉽 함수의 파라미터들을 표 4와 같은 스트링으로 정의한다.

Table 4. Coding for multiparameters identification

$x_1$	width(1)	center(1)	...	width(n)	center(n)
$x_2$	width(1)	center(1)	...	width(n)	center(n)
$u$	position(1)	position(2)	...	position(m)	

여기서, Rule  $i$  는  $i$  번째 규칙( $1 \leq i \leq n$ )을 말하며,  $x_1$ ,  $x_2$  는 입력변수,  $u$  는 출력을 나타낸다.

본 논문에서는 입력변수 2가지( $x_1$ ,  $x_2$ )에 대하여 각각의 멤버쉽 함수의 개수가 다섯개 이므로 중복순열에 의하여  $5 \times 5 = 25$  가지의 퍼지규칙으로 구성된다.(표 2) 그리고 각각의 멤버쉽 함수에 할당되는 중심점의 좌표 변수와 너비 변수가 각각 포함되므로 총 20개의 스트링으로 구성된다.

각 스트링을 평가하기 위해서 적합도를 여러 방법으로 선정할 수 있다. 본 논문에서는 T 시간 동안에 취득한 실제출력과 기준 입력간의 오차의 절대치의 합의 평균을 이용하였다.

$$\text{적합도} = \frac{1}{1 + \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N |\text{error}_i|} \quad (2)$$

$N$  : T 시간동안에 취득한 데이터의 수

error : 기준입력 - 실제출력

그리고 이진 스트링을 다루는데 있어서 발생하는 구조적인 문제점 중의 하나인 조기수렴(pre-mature convergence)이나, 최적값 근처에서 값이 수렴하지 못하고 진동(oscillation)하는 문제를 해결하기 위하여 elitest 유전 알고리즘을 채택하였다. 이는 후손의 목적함수 값이 원래 집단 내의 최소 적합도 값과 비교하여 그 값보다 크면 그 집단에 가입시키고 그렇지 않으면, 이전 유전자는 버린다. 이는 기존 알고리즘의 문제점 중, 선택과 교배시의 한계점을 극복하고자 하는 시도이다.

제어규칙을 최적화 시키기 위해서는 입력변수의 조건에 따른 출력변수의 상태값으로 구성된 문자열을 유전 연산하여 적합도가 가장 우수한 제어규칙을 선정한다. 제어규칙의 최적화에 부가하여 멤버쉽 함수를 최적화시키면 좀더 빠르고, 정확한 계산이 가능해진다.

유전알고리즘을 이용한 퍼지규칙 및 멤버쉽함수를 튜닝하기 위한 전체 하드웨어 구성도는 그림 4와 같다.

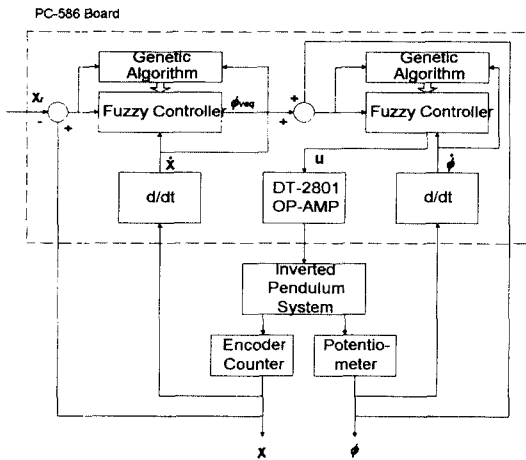


Fig 4. Genetic Algorithm based Optimal Fuzzy Controller for the inverted pendulum system

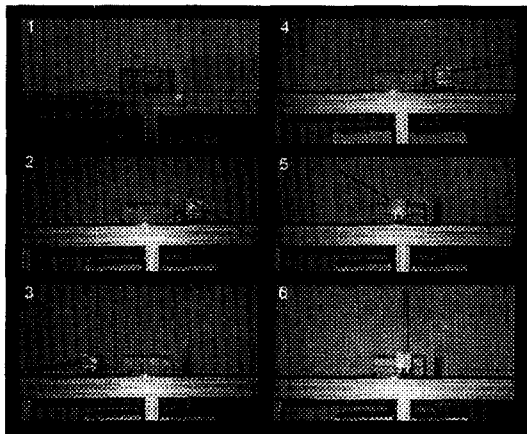


Fig 5. Inverted pendulum system control result

## V 결론

본 논문에서는 비선형성이 강한 도립 진자 시스템의 안정화 제어에 퍼지 제어를 사용하는 경우, 각 멤버쉽 함수와 제어규칙을 유전알고리즘으로 최적화 시키는 방법을 제시하였다. 이것은 외란에 강인한 특성을 가지면서도 경험자나 숙련자의 지식 없이 멤버쉽 함수와 제어규칙이 자동 동정되어지므로 고전적인 제어기보다 우수하다. 그러나 유전알고리즘은 고속 연산이 가능한 계산기 기반 알고리즘(Computational Algorithm)이므로,

실제 플랜트에 적용하기가 난해하다는 단점이 있으므로 실시간 제어(on line control)에 관한 연구가 뒤따라야 할 것으로 보인다.

## VI 참고문헌

- [1] 퍼지 추론 기법을 이용한 도립 진자 시스템의 안정화 제어에 관한 연구, 최우진, 1995, 동아대학교 전기기공학과, 석사학위 논문
- [2] Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs, Zbigniew Michalewicz, Springer-Verlag, 1994
- [3] Generic Algorithms in search, optimization & Machine Learning, David E. Goldberg, Addison-Wesley Publishing Company, Inc, 1989
- [4] Autoruning for Fuzzy-PI Control Using Genetic Algorithm, Yuan-Pao Hsu, Ching-Chih Tsai, ©1996 IEEE
- [5] Generic Algorithm for Fuzzy Control, D.A. Linkens, H.O. Nyongesa, ©IEE 1995 Proc.-Control Theory Appl., Vol 142, No. 3, May
- [6] Advance in Genetic Programming, Kenneth E. Kinneer, Jr., ©1994 MIT press.
- [7] “現代制御理論を使った倒立振子の實驗 [1]”, 川谷 實治, 트랜ジスタ技術, pp.315- 322, May, 1993.