

RVEGA 최적 퍼지 제어기를 이용한 비선형 시스템의 안정화 제어에 관한 연구

이 준 탁* · 정 동 일**

Stabilization Control of the Nonlinear System using A RVEGA
- based Optimal Fuzzy Controller

J. T. Lee* · D. I. Chung**

Key words : RVEGA, Fuzzy Controller, Nonlinear System

Abstract

In this paper, we proposed an optimal identification method of identifying the membership functions and the fuzzy rules for the stabilization controller of the nonlinear system by RVEGA(Real Variable Elitist Genetic Algorithm). Although fuzzy logic controllers have been successfully applied to industrial plants, most of them have been relied heavily on expert's empirical knowledge. So it is very difficult to determine the linguistic state space partitions and parameters of the membership functions and to extract the control rules.

Most of conventional approaches have the drastic defects of trapping to a local minima. However, the proposed RVEGA which is similar to the processes of natural evolution can optimize simultaneously the fuzzy rules and the parameters of membership functions.

The validity of the RVEGA - based fuzzy controller was proved through applications to the stabilization problems of an inverted pendulum system with highly nonlinear dynamics. The proposed RVEGA - based fuzzy controller has a swing - up control mode(swing - up controller) and a stabilization one(stabilization controller), moves a pendulum in an initial stable equilibrium point and a cart in an arbitrary position, to an unstable equilibrium point and a center of the rail. The stabilization controller is composed of a hierarchical fuzzy inference structure; that is, the lower level inference for the virtual equilibrium point and the higher level one for position control of the cart according to the firstly inferred virtual equilibrium point. The experimental apparatus was implemented by a DT - 2801 board with A/D, D/A converters and a PC - 586 microprocessor.

* 동아대학교 전기·전자·컴퓨터공학부 교수 (원고접수일 : 97년 2월)
** 동아대학교 정보통신 연구소 연구원

1. 서 론

불확실한 비선형 시스템을 제어하기 위해 수학적으로 정확하게 모델링한다는 것은 대단히 곤란하며, 모델링된다해도 대단히 복잡해진다. 특히, 동작 범위가 넓거나 시변 파라미터와 외란이 있는 비선형 시스템의 해석 및 제어 문제에서는 최적제어와 같은 고전적 제어 기법은 적절하지 못하다. 그러나, 인간의 일상생활에서 사용되는 애매한 언어적 정보 및 추론을 위해 1965년 L. A. Zadeh가 제안한 퍼지 제어 기법은 수학적 모델이 곤란하거나, 비선형성이 강한 제어시스템에 적극 활용되고 있다^{1,2)}. 그러나, 퍼지제어기의 구성시 규칙과 전·후건부의 파라미터는 전문가의 경험이나, 지식에 의존하여 주관적으로 결정되기 때문에, 안정한 제어 시스템의 설계가 곤란해진다. 따라서, 규칙의 자동 동정 및 전·후건부 파라미터의 최적화는 퍼지 제어에 있어서 중요한 과제 중의 하나이다. 이를 위해 Li와 Tan은 3층의 역전파 신경회로망을 이용하여 최적의 소속함수를 얻고자 하였으며, Wang과 Chen은 다층 신경회로망을 이용하여 퍼지제어 규칙 및 소속함수를 학습시키는 방법을 제안한 바 있다. 특히, Karr C는 유전 알고리즘을 이용하여 미리 정해진 규칙 베이스로부터 규칙의 수를 결정한 다음, 소속함수의 파라미터를 조정하는 기법을 제안하였는데, 이들 알고리즘은 제한된 문제에만 유용성이 있을 뿐 만 아니라, 초기 수렴 또는 긴 수렴 시간을 요하는 경향이 있으며, 알고리즘의 일반화가 곤란한 문제점도 있다^{3~10)}.

따라서, 본 논문에서는 로켓트나 2족 보행 로봇(biped robots)^{11~14)} 자세 제어의 기본이 되는 비선형 시스템의 하나인 독립 진자 시스템을 퍼지 추론 기법을 이용하여 안정화 제어하는 경우, 퍼지 규칙 및 퍼지 소속 함수를 RVEGA에 의해 최적화시키게 된다^{3, 6~9)}. 독립진자의 퍼지 안정화 제어기는 크게 두 부분으로 구성되는데, 고유 안정 평형점의 진자를 안정화 근방의 영역으로 회전시켜 올리는 피드포워드 형태의 제어기인 상선회(swing-up) 제어기와, 안정화 영역내의 진자를 불안정 평형점에 위치하도록 하며 동시에 원하는 위치로 이동시키는 안정화(stabilization) 제어기

로 구성된다. 특히, 안정화 제어기는 진자와 운송차의 상호작용을 고려한 가상 평형점(virtual equilibrium point)을 하부 구조에서 추론하고, 상부 구조에서는 이를 고려한 진자의 제어를 행하는 이중 추론 구조로 구성된다. RVEGA를 이용한 최적화는 퍼지 추론 과정이 들어가 있는 안정화 제어 부분에서 이루어 지는데, 가상 평형점 및 진자의 제어를 행하는 소속 함수의 최적화를 동시에 행하게 된다. 이는 단순 유전 알고리즘에 비해 수렴시간을 단축시킬 뿐만 아니라 전역 최적해를 찾을 수 있는 장점이 있다. 그리고, 이를 비선형성이 강한 독립진자 시스템의 안정화 제어에 적용하여 시뮬레이션과 DT2801 Board 및 80586 마이크로프로세서로 최적 퍼지 제어기를 구현함으로써 그 유용성을 입증하고자 한다.

2. 독립 진자 시스템 과 수학적 모델링

그림 1은 독립 진자 시스템의 구조를 나타낸다. 진자를 안정화시키기 위하여 운송차는 진자가 넘어지는 방향 좌우로 움직이며, 이것을 움직이는 힘은 직류 서보 전동기에서 전달된다. 운송차 및 전동기에 부착된 각도 및 위치센서는 각각 진자의 각도와 운송차의 위치를 검출하며, 제어기는 이들 정보에 근거하여 안정화 제어신호를 전동기에 공급한다.

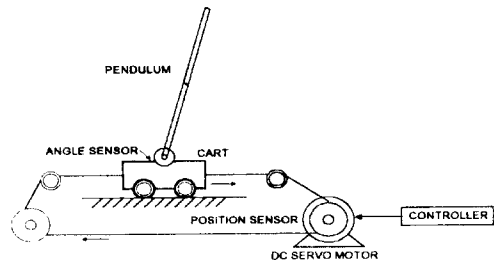


Fig. 1 Schematic diagram for an inverted pendulum system

도립진자 시스템의 수학적 모델은 마찰을 고려하면 다음과 같은 미분방정식들로 표현되어 진다.

$$\text{운 송 차 : } M\dot{z}(t) + \mu\dot{z}(t) = au(t) - H(t) \quad (1)$$

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

$$\begin{aligned} \text{수 직 방 향 : } V(t) - mg &= m \frac{d^2}{dt^2} \{L \cos \phi(t)\} \\ &= -mL\{\ddot{\phi}(t)\sin\phi(t) + \dot{\phi}^2(t)\cos\phi(t)\} \quad (3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{회 전 방 향 : } J_p \ddot{\phi}(t) &= LV(t)\sin\phi(t) \\ &\quad - LH(t)\cos\phi(t) - \eta\dot{\phi} \quad (4) \end{aligned}$$

각 변수들에 대한 정의와 그 값들은 표 1과 같다.

위치에 있는 진자를 불안정 평형점 주위의 안정화 영역으로 회전시켜 들어올리는 상선회 제어를 행하게 된다. 그 다음, 불안정 평형점 근방의 진자를 불안정 평형점으로 이동시켜 레일의 중심에 위치시키는 안정화 제어를 행한다. 이 때, 센서를 통해 운송차의 위치 $z[m]$ 와 진자의 각도 $\phi[rad]$ 가 80586 마이크로프로세서에 입력된다.

한편, 임의 위치의 진자를 고유 불안정 평형점으로 이동시키기 위해서는 bang-bang 타입의 상선회 제어기를 사용한다. 그러나, 진자를 도립시킨 채로 레일의 임의 위치로 이동시키는 안정화 제어기는 RVEGA에 의해 상위레벨 및 하위레벨의 이중 추론 구조의 소속 함수값과 제어규칙을 최적화하게 된다.

Table 1. Parameters of the inverted pendulum system

Parameter	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 reactive force at the pivot	-----	kg · m/s ²
H	Horizontal reactive force at the pivot	-----	kg · m/s ²
J_p	Inertia moment of the pendulum	0.00292	kg · m ²
M	Mass of the cart	0.886	kg
z	Horizontal position of the cart	- 0.655 ~ 0.655	m
ϕ	Angle of the pendulum from the vertical line	$-\pi \sim \pi$	rad
r	Wire belt pulley radius	0.0235	m
α	Driving force coefficient	0.738	kg · m/s ² 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 ²
μ	Friction coefficient	2.215	kg/s
η	Coefficient related to rotation moment of the pendulum	0.00199	kg · m ² /s

3. 도립 진자 시스템의 안정화 제어기 설계

도립 진자 시스템을 제어하기 위해서는 먼저, 초기 상태 즉, 아래로 늘어뜨려진 고유 안정 평형점

3.1 상선회 제어기의 설계

상선회 제어기는 고유 안정 평형점에 위치하고 있는 진자를 불안정 평형점 주위의 안정화 영역으로 이동시킨다. 이 경우 상선회 제어기는 직류 서보 전동기에 일정 전압을 그림 3과 같이 bang-

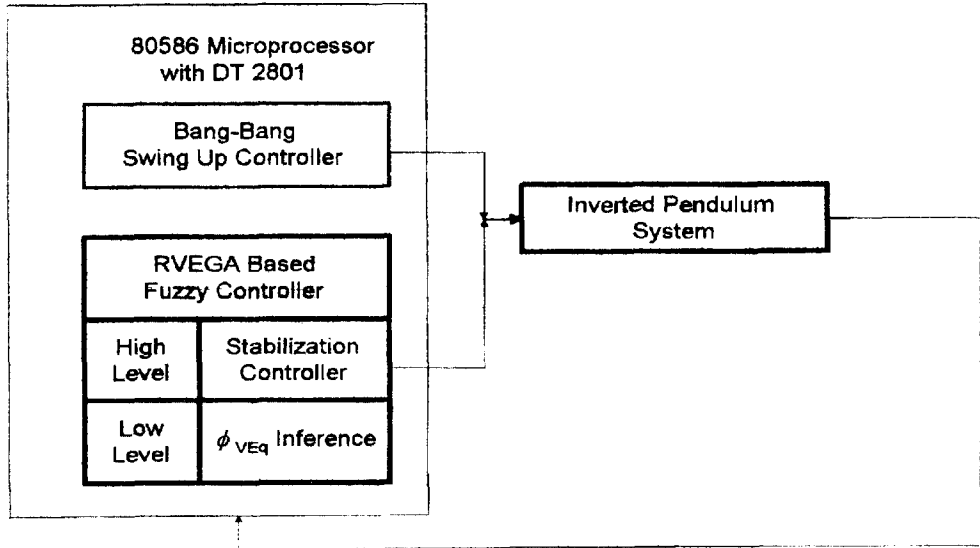


Fig. 2 Block diagram of the proposed fuzzy control system using RVEGA

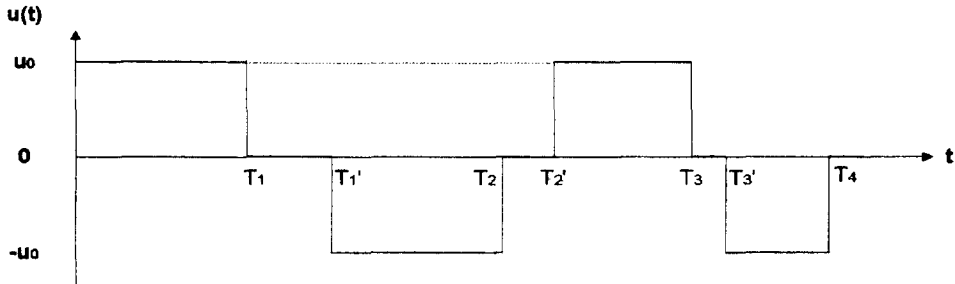


Fig. 3 Candidates for swing - up control

bang 타입으로 인가한다.

정확한 입력 전압의 제어 주기는 다음의 식(5)로 표현될 수 있으며 제어 주기는 도립 진자 시스템의 진자가 갖는 자유 진동 특성에 맞게 시행착오를 거쳐 적절히 결정한다.

있는 경우, 진자를 불안정 평형점에 위치시키고, 레일의 한가운데로 운송차를 이동시키는 제어를 행한다. 그러나, 퍼지 추론 시스템에서 가장 어려운 점은 제어 규칙과 소속 함수를 구성하는 것이다. 도립 진자 시스템과 같은 비선형 다변수 특성

$$\begin{aligned}
 u^{in}(t; T_1, T_1', T_2, T_2', \dots, T_n) &= u_0 \quad (0 \leq t < T_1 \text{ or } T_2' \leq t < T_3 \dots) \\
 &= 0 \quad (T_1 \leq t < T_1' \text{ or } T_2 \leq t < T_2' \dots) \\
 &= -u_0 \quad (T_1' \leq t < T_2 \text{ or } T_3' \leq t < T_4 \dots)
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

3.2 안정화 제어기의 설계

안정화 제어는 운송차가 레일의 영역 중의 임의 위치에 있으나, 진자가 안정화 가능한 영역 주위에

을 갖는 시스템의 규칙을 단순히 전문가의 경험적 지식이나 실험에 의해 구성하는 일은 상당히 주관적이고, 또한 경험에 의존하기 때문에 최적의 성능

을 갖는 제어규칙이라고 보기 어렵다. 따라서 본 절에서는 RVEGA에 의해 최적의 성능을 갖는 퍼지 제어를 설계하는 방법에 대해 논의한다. 제 3.1절과 같은 진자의 제어는 운송차의 동특성을 완전히 무시하였으므로 진자는 어느 정도 제어되지만 운송차가 원하지 않는 위치로 이동하는 문제가 발생한다. 이를 위해 본 논문에서는 진자의 각도 ϕ 의 동적 평형점(dynamic equilibrium point)에 대한 가상 평형점(virtual equilibrium point) ϕ_{VEq} 를 설정하여 진자의 각도와 운송차의 위치 제어를 동시에 실현한다. 즉, 하위 레벨 제어기에서는 운송차의 위치 z 와 속도 \dot{z} 에 대하여 가상 평형점 ϕ_{VEq} 를 퍼지 추론하고, 이에 따라 진자의 각도 ϕ 와 각도의 변화량 $\dot{\phi}$ 에 따른 제어로 운송차의 최종 위치 제어를 실현할 수 있다.

먼저, 가상 평형점을 결정하기 위한 퍼지 추론 과정에서, 운송차의 위치 및 위치 변화량에 대한 언어적 퍼지 변수의 개수가 각각 3개씩이므로 12개의 스트링이 필요하고, 출력 변수 5개를 포함하여 모두 17개의 스트링이 필요하게 된다.

또한, 운송차의 최종 위치제어를 위한 퍼지 추론 과정에서, 진자의 각도 및 각도의 변화량에 대한 언어적 퍼지 변수의 개수가 각각 5개씩으로 20개의 스트링이 필요하고, 출력 변수 9개를 포함하면, 스트링의 개수는 모두 29개이다. 이상의 두 가지 퍼지 추론 과정에서 필요한 스트링의 개수는 46개가 된다.

그리고, 퍼지 규칙은 입력 변수 x_1, x_2 에 대한 소속 함수 및 출력 변수 y 에 의해 식 (6)과 같이 정의한다.

$$i \text{ th Rule : If } x_1 \text{ is } A_{i1} \text{ and } x_2 \text{ is } A_{i2} \text{ Then } y \text{ is } Z_i \quad (6)$$

$$(i = 1, 2, \dots, n)$$

식 (6)의 규칙 및 전·후건부 소속 함수 A_{i1} 및 A_{i2} 의 중심점(center)과 폭(width) 그리고, singleton Z_i 의 최적화는 RVEGA에 의해서 행해진다.

재생산 과정에서 자주 이용되는 엘리티스트 전략은 현집단에서 최적의 개체를 저장하고 있다가 재생산, 교배, 돌연변이를 거쳐 생산되는 다음 세대 집단에서 이것이 소멸되면 저장한 개체를 다시

복사하여 최적 개체가 한 세대에서 다음 세대로 항상 살아 남도록 보장해주는 것이다. 한편, 실변수 유전 알고리즘의 집단은 각 파라미터의 상·하한치 내에서 랜덤하게 발생시켜서 얻어진 실수값으로 표현되는 염색체로 구성된다. 각 파라미터 즉, 각 개체의 특성들은 관련 스트링들을 하나로 통합한 유전 염색체로 나타낼 수 있으며, 표 2에서는 입력 및 출력변수에 대한 소속 함수의 파라미터들을 염색체로 표현하는 방법을 나타내고 있다. 여기서, 입력변수는 삼각형의 소속 함수를 가지는 퍼지 집합으로 분할되며, 출력 변수는 singleton으로 하였다.

Table 2. Coding for identification of parameters

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

진화과정에서 새로운 염색체가 생성되면 이를 바탕으로 각각의 퍼지규칙들을 실제의 플랜트에 대하여 평가할 수 있게 된다. 평가를 위해 사용되는 적합도 함수는 여러 방법으로 선정할 수 있다. 본 논문에서는 식 (7)과 같이 T 시간 동안에 취득한 실제상태 출력과 목표상태 입력간의 오차의 절대치의 합의 평균을 이용하였다.

$$\text{적합도} = \frac{1}{1 + \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N |\text{error}_i|} \quad (7)$$

단,

N : T 시간동안에 취득한 데이터의 수
 error : 목표상태 - 실제상태

이다.

그림 4는 RVEGA의 동작과정을 flow chart로 나타낸 것이다.

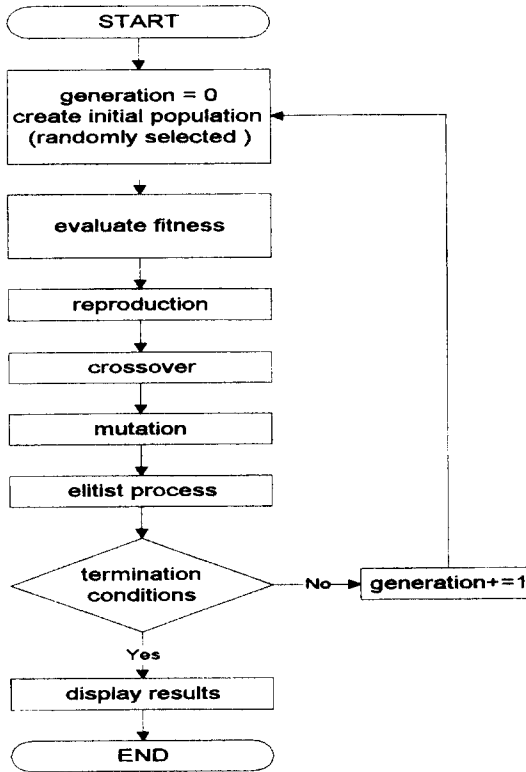


Fig. 4 Flowchart of the RVEGA

4. 시뮬레이션 결과 및 고찰

제어기의 소속 함수를 최적한 값으로 튜닝하기 위해 사용된 유전 알고리즘의 파라미터는 표 3과 같다.

Table 3. Parameters of RVEGA

crossover rate	0.85
mutation rate	0.25
size of population	20
maximum generation	150

그리고, 가상 평형점 추론과 진자의 제어를 위한 퍼지 규칙 및 소속 함수를 전문가의 경험적 지식에 의한 값과, RVEGA에 의해 최적화된 값을 비교하

였다.

표 4에 운송차의 위치 z 및 위치 변화량 \dot{z} , 그리고 가상 평형점 ϕ_{VEq} 를 결정하기 위한 규칙을 나타내고 있다.

Table 4. Fuzzy rules for the virtual equilibrium point ϕ_{VEq}

(a) Heuristic				(b) RVEGA			
\dot{z} \ z	NE	ZO	PO	\dot{z} \ z	NE	ZO	PO
NE	NS	NB	ZO	NE	ZO	NB	PS
ZO	NS	ZO	PS	ZO	ZO	PS	NS
PO	ZO	PB	PS	PO	PS	PB	NS

단,

PO : Positive NE : Negative

NB : Negative Big NS : Negative Small ZO : Approximately Zero

PS : Positive Small PB : Positive Big

이다.

그림 5는 초기 및 경험자에 의해 개선된 소속 함수와 RVEGA에 의해 튜닝된 소속 함수를 도시하고 있다. 그림 5(a)는 기존의 퍼지 제어에 의한 소속 함수이며, 그림 5(b)는 경험자에 의해 최적화된 퍼지 제어기의 소속 함수이다. 그리고 그림 5(c)는 유전 알고리즘에 의해 최적화된 퍼지 제어기의 소속 함수를 나타내고 있다.

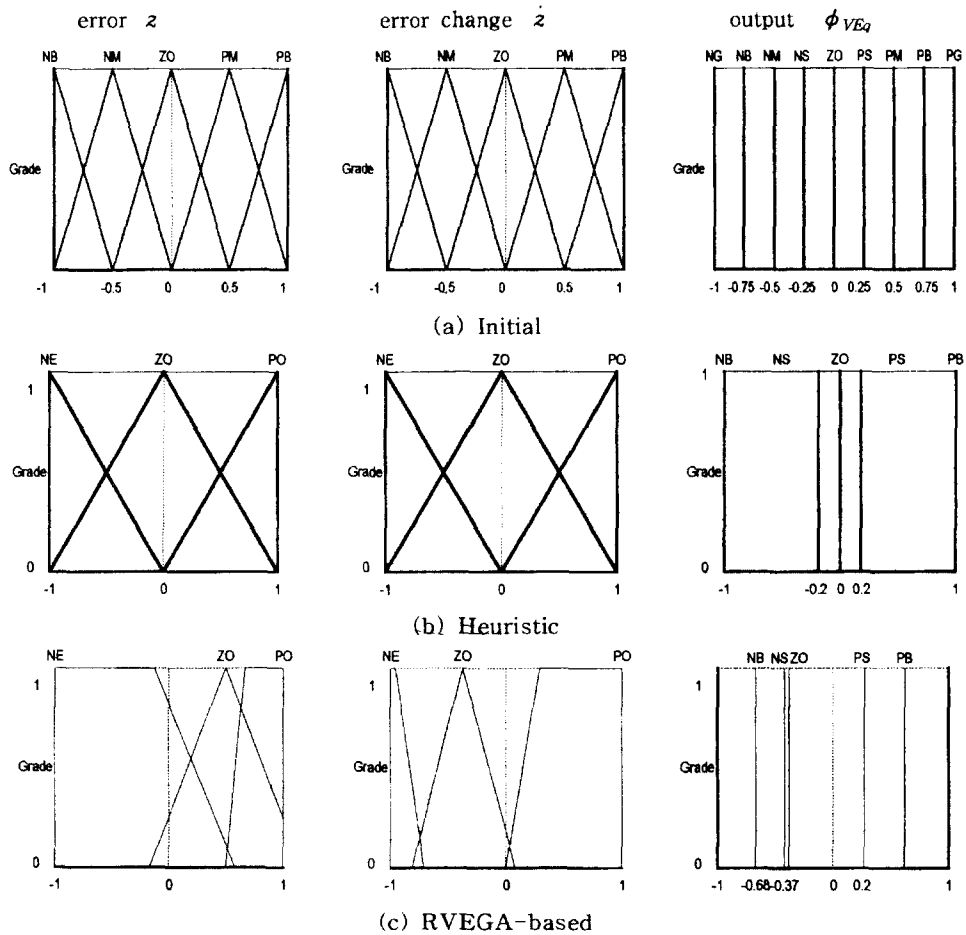


Fig. 5 Fuzzy membership function patterns for the virtual equilibrium point ϕ_{VEq}

그리고, 진자의 각도 ϕ 및 각도의 변화량 $\dot{\phi}$ 에 대하여 입력전압 v 를 이용하여 운송차를 목표 위치로 제어하기 위한 규칙이 표 5에 나타나 있으며,

각 경우에 대한 소속함수는 그림 6에 도시되어 있다.

Table 5. Fuzzy rules for the inverted pendulum

(a) Initial and Heuristic

$\phi \backslash \phi$	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

(b) RVEGA

$\phi \backslash \phi$	NB	NM	ZO	PM	PB
NB	NS	NG	ZO	NB	PB
NM	NG	ZO	NB	PB	PS
ZO	ZO	NB	PB	PS	NM
PM	NB	PB	PS	NM	PM
PB	PB	PS	NM	PM	PG

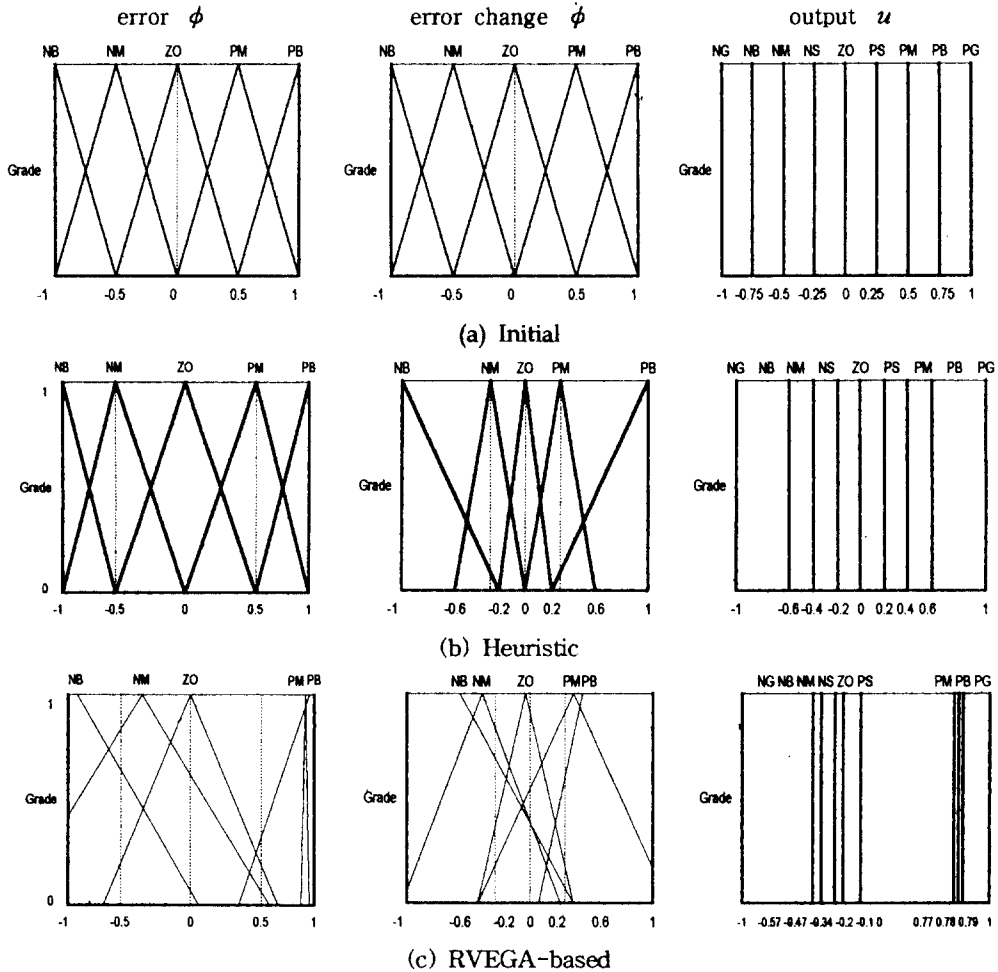


Fig. 6 Fuzzy membership function patterns for cart position control

단,

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

이다.

그림 6(a)는 진자의 각도 ϕ 및 각도의 변화량 $\dot{\phi}$, 그리고 입력전압 v 의 기존의 퍼지 제어에 의한 소속 함수이며, 그림 6(b)는 경험자에 의해 최적화된 퍼지 제어기의 소속 함수이다. 그리고 그림 6(c)은 유전알고리즘에 의해 최적화된 퍼지 제어기의 소속 함수를 나타내었다.

운송차의 초기 위치가 $-0.3[m]$ 이고, 진자의 초기 각도가 $-0.2[rad]$ 일 때의 각 경우에 대한 시뮬레이션 결과를 그림 7에 도시하였다. 각각은 운송차의 위치, 진자의 각도, 제어 신호, 가상 평형점을 나타낸다.

운송차의 초기 위치 $-0.3[m]$, 진자의 초기 각도 $-0.2[rad]$ 의 경우, 그림 7(a)는 경험자에 의해 개선된 퍼지 제어기의 결과이며, 그림 7(b)는 RVEGA에 의한 최적 퍼지 제어기의 시뮬레이션 결과이다. 기존 퍼지 제어를 이용한 경우, 진자 및 운송차가 안정되는 데는 각각 5.25초 및 7초가 소요되었다. 그러나, RVEGA 퍼지 제어를 이용한 경우는 공히 4.5초에서 안정됨으로써 기존 퍼

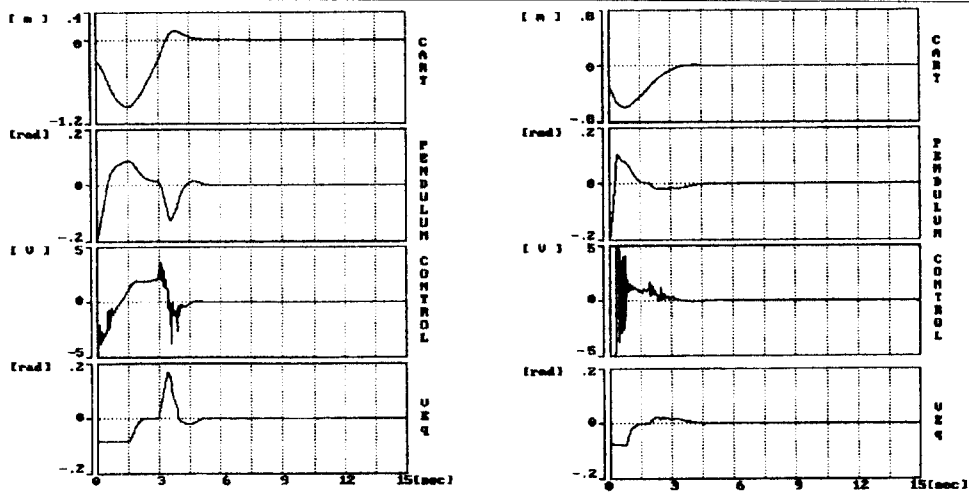


Fig. 7 Simulation results for the fuzzy controllers

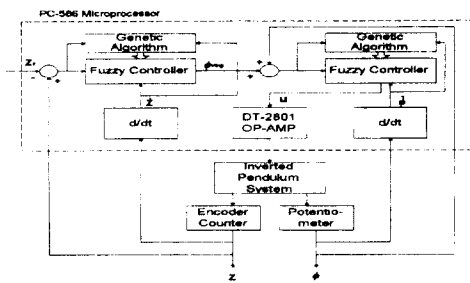


Fig. 8 RVEGA - based optimal fuzzy controller

지 제어기에 비해 다소 우수하게 나타났다.

그리고, 독립 진자 시스템의 안정화 제어 실험 장치는 그림 8과 같으며, 진자의 각도 및 변화량은 전위차계로 계측하고, 운송차의 위치는 엔코더 및 카운터로 계측한다. 계측된 정보들은 A/D 컨버터인 DT-2801 Board를 거쳐 디지털량으로 변환되고, 이 값들은 PC-586 마이크로프로세서로 전달된다. 이 전달된 값을 통해 퍼지 추론 제어 기법을 이용하여 온라인으로 직류 서보 전동기의 입력 전압을 결정한다. 제어 입력 신호 u 가 계산되어지면

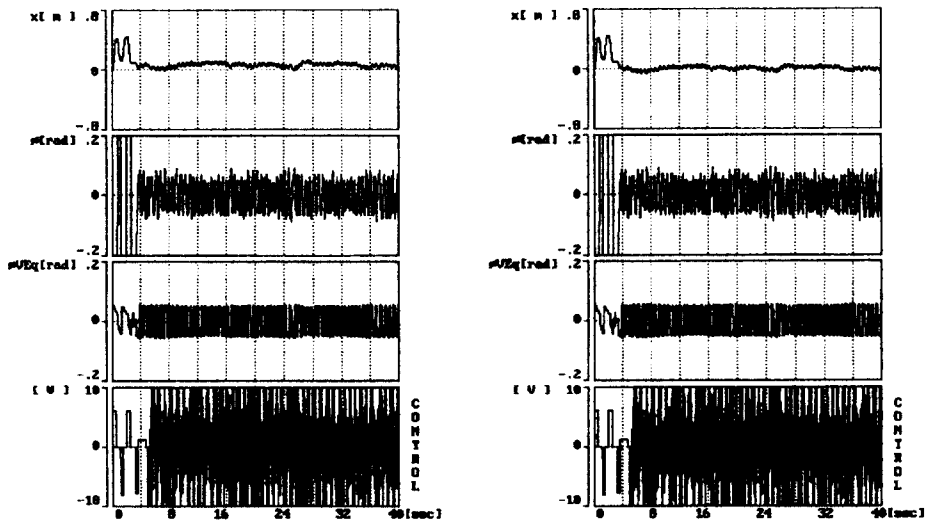


Fig. 9 Experimental results for the fuzzy controllers

다시 DT-2801 D/A 컨버터를 통해 $-10[v] \sim +10[v]$ 의 아날로그 전압이 연산 증폭기로 증폭되어 직류 서보 전동기의 조작량으로 공급된다.

운송차의 초기 위치 $-0.4[m]$, 진자의 초기 각도 $0[rad]$ 의 경우, 퍼지 제어 실험 결과가 그림 9에 나타나 있다. 각각은 운송차의 위치, 진자의 각도, 제어 신호, 가상 평형점을 나타낸다.

상선회 제어와 안정화 제어를 동시에 행한 경우로서, 그림 9(a) 및 9(b)는 경험자에 의해 개선된 퍼지 제어기 및 RVEGA에 의한 퍼지 최적 제어기의 결과를 나타내고 있다.

그리고, 상선회 제어기 및 안정화 제어기를 함께 사용하여 진자의 고유 안정 평형점에서 제어를 시작하되 운송차를 임의의 위치에 두고 실험한 결과 두 제어기가 안정화 영역 부근에서 적절히 전환되어 진자의 제어 및 운송차의 위치 제어가 성공적으로 실현되었다. 즉, 기존 퍼지 제어기를 이용한 경우, 진자는 3.5초 시점에서 안정화되고 있으나, 레일 자체 및 외부의 미약한 충격, 서보 전동기의 불감대 및 역기전력 효과등으로 $\pm 0.08[rad]$ 만큼의 리미트 사이클 진폭을 갖고 지속적인 진동이 발생함을 볼 수 있다. 또한 운송차는 7초 후에 안정화되는 경향을 보이거나, 약 10cm 정도의 오차를 나타내었다. 그러나, RVEGA 퍼지 제어기는 진자 및 활차가 공히 4초 후에 안정화되고 있다. 각각의 경우, 상선회 제어기 및 안정화 제어기가 성공적으로 동작되었으며, RVEGA 퍼지 제어기가 일반적인 퍼지 제어기에 비해 상당히 우수하다는 것을 알 수 있다. 한편, 진자에 스텝상의 충격 외란 부가 및 진자의 길이를 변화시킨 경우에도 안정하게 되는 강인성을 확인할 수 있었다. 실험에서 진자와 운송차의 상호작용을 고려하지 않고 진자만 제어한 경우를 보면 2[sec] 정도 동안만 진자가 제어되었다. 특히, 진자의 각도를 제어하기 위해 운송차는 좌측으로 계속 이동하여 결국 레일의 끝에 설치된 스톱퍼에 부딪혀 버렸다. 반면, 본 논문에서 제안하는 RVEGA 퍼지 제어기를 이용하여 제자리에 머무는 제어를 수행한 결과 운송차의 위치 제어에 성공하였을 뿐만 아니라 진자의 제어에도 성공하여 진자의 각도 및 제어 신호의 크기가 시간이 지남에 따라 줄어드는 안정적인 특성이 나타났다. 또, 운송

차의 초기 위치를 $-0.4[m]$, 진자의 초기 각도를 여러가지 경우로 한 경우에도 제안하는 퍼지 제어기는 목표 위치에 수렴하였다.

5. 결 론

퍼지 제어 이론은 외란에 강하고, 우수한 제어 성능으로 인해 많은 제어기구에 사용되어져 왔으나, 숙련된 전문가의 경험적 지식 없이 퍼지 제어기의 파라미터를 조정시키는 것은 곤란하였다. 그러나, 본 논문에서는 숙련된 조작자의 경험적 지식이 없어도 퍼지 규칙 및 퍼지 제어기의 전·후건부 파라미터값을 초기 수렴이나 진동 현상 없이 자동 조정할 수 있는 RVEGA에 의해 최적의 응답특성을 가지는 퍼지 제어기를 실현하였다 또한, 비선형성이 강한 독립진자 시스템의 안정화 제어에 적용하여, 최적화되기 이전의 퍼지 제어기와 숙련자에 의해 경험적으로 개선된 퍼지 제어기, 그리고, 제안된 RVEGA에 의해 최적화된 퍼지 제어기의 시뮬레이션 및 실험결과를 비교하였다.

그 결과 숙련자에 의해 파라미터가 조정된 퍼지 제어기보다 RVEGA를 이용하여 최적화된 퍼지 제어기의 응답 특성이 우수함을 알 수 있었다. 특히, PC-586 마이크로프로세서 및 DT-2801 Board에 의해 가상 평형점에 관련된 하위레벨의 퍼지추론 및 진자를 안정시키기 위한 상위레벨의 퍼지추론 과정을 실현한 독립진자 시스템의 안정화 제어기는 성공적으로 동작됨을 확인하였다.

참고문헌

- [1] 菅野道夫, 朴玟用, 崔恒植, 퍼지 제어 시스템, 大英社., 1990
- [2] 寺野 淺居, 菅野 共編, 朴玟用, 崔恒植 譯, 퍼지 시스템의 응용입문, 대영사., 1990
- [3] Zbigniew Michalewicz, "Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs", Springer-Verlag, 1994
- [4] David E. Goldberg, Genetic Algorithms in Search, Optimization & Machine Learning, Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1989

- [5] Yuan-Pao Hsu and Ching-Chih Tsai, "Auto-tuning for Fuzzy-PI Control Using Genetic Algorithm", IEEE, 1996
- [6] D. A. Linkens, H. O. Nyongesa; Genetic Algorithm for Fuzzy Control Part 1: Offline system development and application., IEE 1995 Proc. - Control Theory Appl., Vol. 142, No. 3, May 1995
- [7] D. A. Linkens, H. O. Nyongesa, Generic Algorithm for Fuzzy Control Part 2: Online system development and application., ©IEE 1995 Proc. - Control Theory Appl., Vol. 142, No. 3, May 1995
- [8] Hidyuki Ishigami, Yasuhisa Hasegawa, Toshio Fukuda, Takanori Shibata; Automatic Generation of Hierarchical Structure of Fuzzy Inference by Genetic Algorithm., 0-7803-1901-X/94, IEEE, 1996
- [9] Kenneth E. Kinneer, Jr.; Advance in Genetic Programming, MIT press, 1994
- [10] 川谷 治;現代制御理論を使った倒立振子の實驗 [1], トランジスタ技術, pp.315-322, May, 1993.
- [11] R. Kruse, J. Gebhardt and F. Klawonn; Foundations of Fuzzy Systems, John Wiley & Sons Ltd., 1994
- [12] Shigeyasu Kawaji, Teruyuki Maeda, "Fuzzy Servo Control System for an Inverted Pendulum", Fuzzy Engineering toward Human Friendly Systems, Vol.2, pp.812-823, 1991.
- [13] Kazushi Nakano, Miyoichi Eguchi and Yoshihiro Yamaguchi, "Fuzzy Reasoning Control of Inverted Pendulum with Considering of Interaction with Cart", T.IEE Japan, Vol.115-C, No.1, 1995.
- [14] 최우진, 이준탁, 이상석, "직류 서보 전동기의 위치 제어를 위한 오차 적응 퍼지 PI 제어에 관한 연구", 한국퍼지시스템학회 추계학술논문집 제4권 제2호, pp.248-254, 1994
- [15] 최우진, "퍼지 추론 기법을 이용한 도립 진자 시스템의 안정화 제어에 관한 연구", 동아 대학교 전기공학파, 석사학위 논문, 1995.
- [16] 최우진, 김태우, 이준탁, "적응 퍼지 추론 기법을 이용한 도립 진자 시스템의 안정화 제어에 관한 연구", 한국퍼지및 지능시스템학회 제5권 제2호, pp.174-179, 1995.