

# 퍼지제어를 이용한 수중운동체의 구동장치설계

조현진<sup>o</sup> 양승윤 최중락 이동권  
국방과학연구소

## Design of Actuator for Underwater Vehicle using Fuzzy Logic Control

Hyeon-Jin Cho, Seung-Yun Yang, Joong-Lak Choi, Dong-Kwon Lee  
Agency for Defense Development

### ABSTRACT

This paper describes the design of fuzzy logic controller for underwater vehicle actuator with high hydroload torque disturbance. For real-time processing of the fuzzy rule, the look-up tables including coarse mode and fine mode are used instead of inference engine process. Computer simulations are done in order to analyze the performance of the proposed algorithm and the very useful results are shown to us by comparing with the existing controller.

### I. 서론

L.A.Zadeh에 의해 처음 제시된 퍼지 집합이론은 인간의 의사결정에 있어서 언어적 개념을 수치화하여 처리할 수 있는 구조를 갖고 있기 때문에 인공지능, 경제학, 심리학, 언어학 등에 폭 넓게 활용되고 있다. 공업분야에서는 E.H.Mamdani[1]등에 의해 보일러의 자동제어에 퍼지논리제어기(Fuzzy Logic Controller)가 적용된 후로 상세한 수학적 모델없이 전문가의 경험과 지식만으로 제어를 구성할 수 있다는 잇점이 있으나 추론과정에서 많은 시간이 소요되어 실시간 제어에 어려움이 있었다. 그러나 Y.F.Li 와 C.C.Lau[2]는 퍼지규칙(fuzzy Rule)을 정량화하여 Look-Up Table화 함으로써 추론과정을 제거하여 응답특성이 빠른 서어보 모터를 제어하여 그 유용성을 입증하였다.

본 연구에서는 퍼지규칙을 Look-Up Table화하여 고속 수중운동체의 전기식 구동장치에 적용하여 보았다. 고속 수중운동체의 구동장치는 일반 서어보 시스템과는 달리 제어판의 변위에 따라 외란 동특성이 심하게 변하고 부하특성상 외란토크의 증속성이 매우 크다는 특징을 갖는다.[3] 이런 시스템에 퍼지알고리즘(Fuzzy Algorithm)을 이용한 제어를 구성하고 시뮬레이션을 수행하여 그 결과를 실제 시스템에 기적용되어 있는 비례제어기의 시뮬레이션 결과와 비교함으로써 그 유용성을 검토하고자 한다.

### II. 퍼지제어 시스템 모델링

#### 1. 시스템 모델링

구동장치는 PWM 증폭기, 영구자석, 직류모터, 감속기구 및 부하로 이루어져 있으며 구성도는 그림 1.과 같다.

부하의 특성이 부하관성 모멘트는 매우 적으나 상대적으로 부하토크 외란은 매우 큰 특성을 갖고 있으므로 선정된 모터는 경량에 비해 고출력이다. 전류제한 및 속도제한은 요구특성에 따라 응답특성이 매우 빨라야 하므로 아날로그적으로 설계하였다. 퍼지제어 시스템을 각 요소에 대하여 수학적인 모델링을 거쳐 얻은 전달함수 구성도는 그림 2.와 같고 모터와 관련 데이터는 표 1.과 같다.

#### 2. 외란 모델링

외란은 복잡한 유동현상으로 인하여 이론적으로 해석이 어려우므로 모형에 의한 실험적 방법에 의하여 모델링을 하여야 하나[4], 본 논문에서는 외란토크를 단순히 각 위치에서만 비례하여 발생한다고 가정하고 그림 3.과 같이 모델링하였다.

### III. 퍼지 논리 제어기 설계

#### 1. 기본적인 퍼지집합이론

전체공간(Total Space) X를 x라는 원소들의 집합이라고 할때 전체공간 X에서의 퍼지집합 A는 X의 각 원소와 연관된 멤버십함수(Membership function)  $\mu_A(x)$ 가 1이면 x는 집합 A의 멤버이고  $\mu_A(x)$ 가 0이면 x는 A의 멤버가 아니다. 퍼지집합이론은 복잡한 정리들을 포함하고 있지만 퍼지제어 알고리즘에 사용되는 Look-Up Table을 결정하는 기본 연산 법칙은 다음과 같다.

##### i) A와 B의 합집합

$$\mu(A \text{ OR } B) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x))$$

##### ii) A와 B의 교집합

$$\mu(A \text{ AND } B) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x))$$

##### iii) A의 차집합 A

$$\mu(\text{NOT } A) = 1 - \mu_A(x)$$

여기서 A, B는 퍼지 집합이다.

#### 2. 퍼지 논리 제어기(Fuzzy Logic Controller)

구동장치의 빠른 응답특성을 얻기 위해 Coarse Control 구간에는 비례-미분(PD) 형태의 제어규칙을 사용하고, 또한 외란에 대해 정상상태 오차를 줄이기 위해 Fine Control 구간에서는 비례-적분(PI) 형태의 제어규칙을 사용한다. 제어규칙의 입력변수는 편차(e)와 편차의 변화율( $\dot{e}$ )이 되며 출력변수는 제어입력(U)이 된다. 구동장치는 타각이  $-14^\circ$ 에서  $+14^\circ$ 까지 움직이지만 편차의 범위는  $-4^\circ$ 에서  $+4^\circ$ 까지 선정하여 각 변위 오차가 이보다 클 경우에는 최대 제어입력이 걸리도록 선정하였다. 편차의 변화율은  $70^\circ/\text{sec}$ 에서  $70^\circ/\text{sec}$ 까지로 선정하였고 제어입력(U)은 A/D 변환기의 특성상 최대  $\pm 10$  Volts 로 했다.

제어규칙은 IF-THEN 형태의 언어학적으로 표현될 수 있으며 예를 들면

IF(e=PB AND e=PS) THEN (U=PB)

와 같은 형태이다.

여기서 PB, PS 등은 언어학적인 값(Linguistic Value)인데 본 연구에서는 입력력변수를 5등급으로 양자화하여 다음과 같이 정의한다.

- PB : Positive Big
- PS : Positive Small
- ZE : Zero
- NS : Negative Small
- NB : Negative Big

이에 따라 Coarse Control 를 위한 제어규칙을 정의하면 표 2.와 같다.

제어규칙의 입력력변수를 양자화하여 표 3.에 나타내었고 표 2.의 언어학적인 값을 퍼지화 하기 위해 이산형(Discrete)의 멤버십함수를 도입하여 각 양자화 단계에 해당되는 멤버십함수를 정의하면 표 4.와 같다.

플랜트의 제어입력을 결정하기 위해 제어입력들에 따른 제어규칙에 의해 계산되어지는 면적의 중심이 플랜트의 제어입력이 되는 무게중심법(Center of Gravity Method)을 사용한다. 일반적으로 플랜트 제어 입력(I)은 다음식으로 나타낼 수 있다.

$$I = \frac{\sum(\mu_n \times U_n)}{(\sum \mu_n)}$$

여기서  $\mu$ 는 멤버십 함수이고 U는 Universe of Discourse, 그리고 n은 제어규칙의 수이다.

본 표 1.의 언어학적인 규칙을 Look-Up Table로 만들면 Coarse Control은 표 5.와 같다.

Fine Control은 제어변화율  $\Delta u$ 를 구하기 때문에 제어입력은  $u(k)=u(k-1)+\Delta u$ 로써 퍼지 PI 제어라고 하며, Coarse Control과 동일한 절차를 거치면 표6,7,8의 Look-Up Table을 얻을 수 있다.

#### IV. 시뮬레이션 결과

그림 2.의 고속 수중운동체의 전기식 구동장치에 퍼지제어기를 설계하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션에 사용된 관련 계수값은 표 1.에서와 같으며 외란토크는 그림 3.에서와 같은 크기로 주어진다. 시뮬레이션 흐름도는 그림 4.와 같으며 적용 언어는 Fortran 77, 사용한 컴퓨터는 PC-386이며 Sampling Time은 10m sec 이다.

그림 5.는 초기치가  $-14^\circ$ 이고  $14^\circ$ 의 계단입력의 명령을 주었을 때의 퍼지제어기 및 기적용된 비례제어기의 컴퓨터 시뮬레이션 결과를 나타낸 것인데 모두다 부하토크에 대해서 추종능력이 양호함을 알 수 있다.

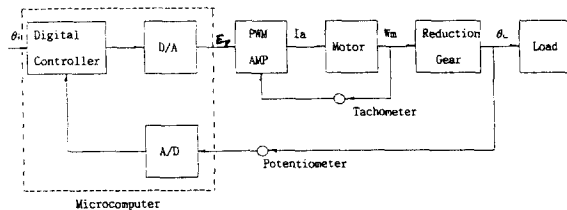


Fig.1 Block Diagram of Plant

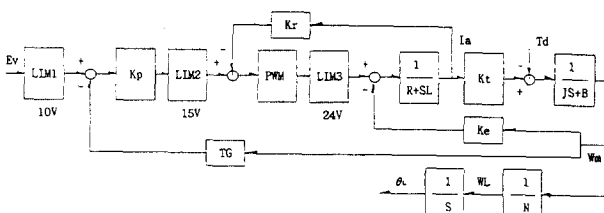


Fig.2 Block Diagram of Transfer Function

#### V. 결론

본 연구에서는 고속 수중운동체의 전기식 구동장치를 위한 퍼지 제어 알고리즘을 설계하였다.

고속 수중운동체의 구동부는 고속 기동함으로 타에 미치는 비정상 토크로 인한 큰 외란이 걸리게 된다.

이러한 외란이 존재해도 설계된 퍼지제어기가 빠르고 정밀한 위치응답을 보여주며, 또한 기계작동 시스템에 적용되어 있는 비례 제어기의 시뮬레이션 결과와 비교함으로써 퍼지 제어기의 적용 가능성을 확인했고, 앞으로 실제 시스템에 적용하는 연구를 계속해야 할 것이다.

#### 참고 문헌

- [1] E.H.Mamdani, "Application of Fuzzy Algorithms for Control of a Simple Dynamic Plant", Proc. IEEE, Vol.121, pp.1585-1588, 1974.
- [2] Y.F.Li, "Development of Fuzzy Algorithms for Servo Systems", IEEE Control Systems Magazine, April 1989.
- [3] 양승윤의, "고속어뢰의 전기식 구동장치 설계연구", ADD Report No.NSRD-513-90299, 1990.
- [4] 박성희의, "선체와 부가물의 상호작용해석을 위한 모형시험", ADD Report No.SENP-413-87056, 1986.
- [5] George J.Klir, "Fuzzy Sets, Uncertainty and, Information", Prentice/Hall, 1988.

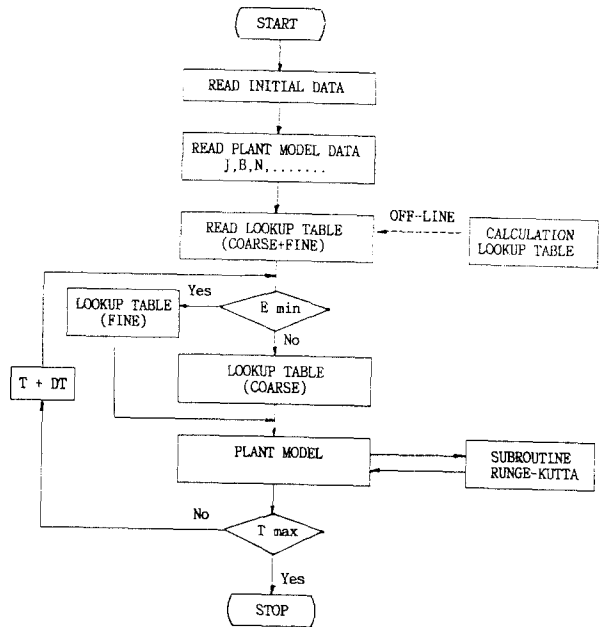
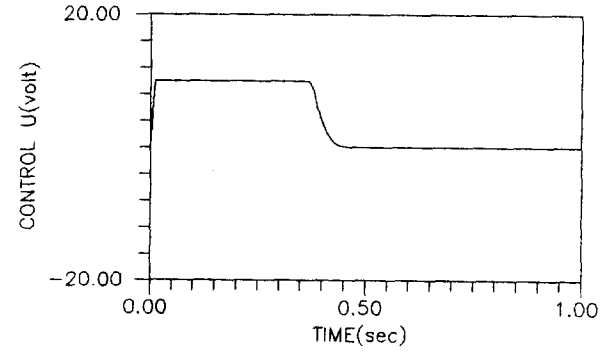
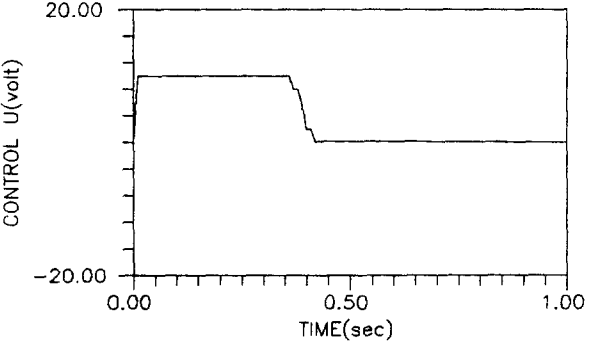
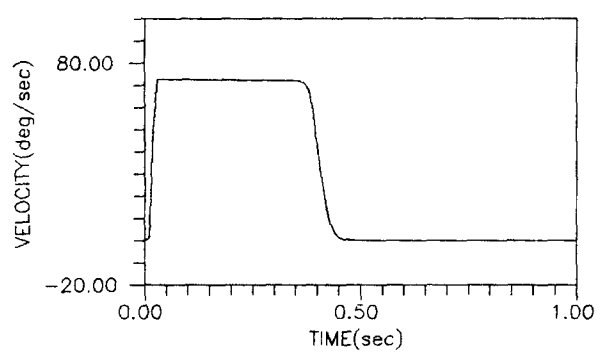
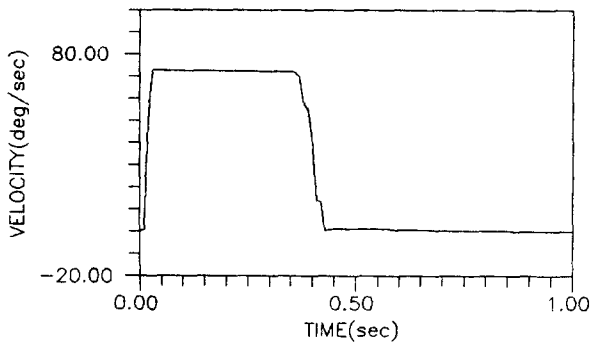
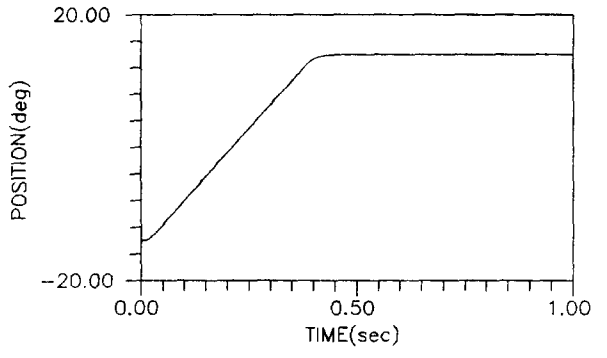
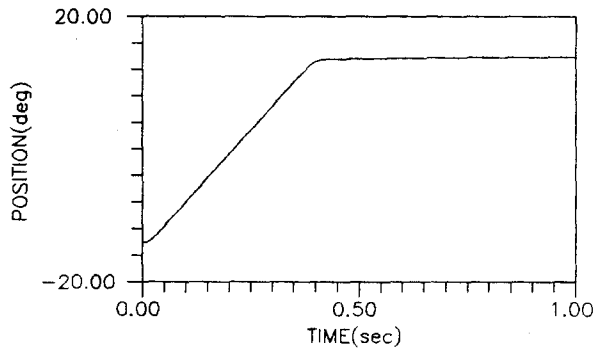


Fig. 4 Flow Chart of Simulation Program



(a) Fuzzy Controller

(b) P-Controller

Fig.5 Simulation Results

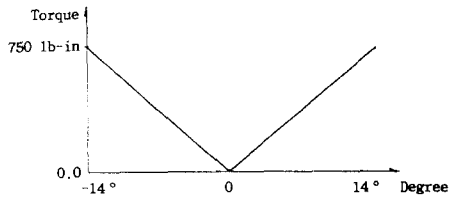


Fig. 3 Disturbance Torque Curve Dependent to Rudder Angle.

Table 1. Coefficients of Motor and Load

Symbol	Value	Unit	Nomenclature
Kp	229.2	—	Velocity Loop Amplifier
PWM	2.0	—	PWM Amplifier
Kr	1/1000	Ohm	Shunt
L	Neglect	H	Motor Inductance
R	1.6553	Ohm	Motor Resistance
Kt	0.02154	Nm/Amp	Motor Torque Constance
Ke	0.02154	Volt/rad/sec	Motor EMF Back
J	2x10	Kg.m <sup>2</sup>	Total Inertia
B	Neglect	Nm sec/rad	Viscous Friction
N	316	—	Gear Ratio
TG	2.62	Volt/KRPM	Tachometer
LIM1	±10	Volt	Limit Voltage of D/A Output
LIM2	±15	Volt	Limit Voltage of Velocity Loop
LIM3	+ 24	Volt	Limit Voltage of PWM Amp

Table 4. Discrete Membership Function

Quantized Levels Linguistic Level	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
PB	0	0	0	0	0	0	0	0	0.2	0.6	1
PS	0	0	0	0	0	0	0.4	0.8	0.8	0.8	0
ZO	0	0	0	0.2	0.6	1	0.6	0.2	0	0	0
NS	0	0.4	0.8	0.8	0.4	0	0	0	0	0	0
NB	1	0.6	0.2	0	0	0	0	0	0	0	0

Table 5. Look-Up Table for Coarse Control

Quantized Levels Linguistic Level	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
-5	-5.0	-5.0	-5.0	-5.0	-5.0	-5.0	-5.0	-5.0	-5.0	-5.0	-5.0
-4	-5.0	-4.0	-4.0	-4.0	-4.0	-5.0	-4.0	-4.0	-4.0	-4.0	-4.0
-3	-5.0	-4.0	-4.0	-4.0	-4.0	-5.0	-4.0	-4.0	-3.0	-3.0	-3.0
-2	-5.0	-4.0	-3.0	-3.0	-3.0	-4.0	-3.0	-2.0	-1.0	-1.0	-1.0
-1	-5.0	-4.0	-3.0	-2.0	-2.0	-2.0	-1.0	-0.0	1.0	1.0	2.0
0	-5.0	-4.0	-3.0	-2.0	-1.0	0.0	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0
1	-2.0	-1.0	-1.0	0.0	1.0	2.0	2.0	2.0	3.0	4.0	5.0
2	1.0	1.0	1.0	2.0	2.0	4.0	3.0	3.0	3.0	4.0	5.0
3	3.0	3.0	3.0	4.0	4.0	5.0	4.0	4.0	4.0	4.0	5.0
4	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	5.0	4.0	4.0	4.0	4.0	5.0
5	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0

Table 2. Control Rule for Coarse Mode

Error Change (ė) Error(e)	NB	NS	ZO	PS	PB
NB	NB	NB	NB	NB	NB
NS	NB	NS	NB	NS	NS
ZO	NB	NS	ZO	PS	PB
PS	PS	PS	PB	PS	PB
PB	PB	PB	PB	PB	PB

Table 3. Quantized Variables(Coarse Control)

e (Deg)	ė (Deg/sec)	U (Volt)	Quantize Level
-4.0	-70	-10	-5
-3.2	-56	-8	-4
-2.4	-42	-6	-3
-1.6	-28	-4	-2
-0.8	-14	-2	-1
0	0	0	0
0.8	14	2	1
1.6	28	4	2
2.4	42	6	3
3.2	56	8	4
4.0	70	10	5

Table 6. Control Rule for Fine Mode

Error Change(ė) Error(e)	NB	NS	ZO	PS	PB
NB			NB	NS	
NS			NS	ZO	PM
ZO	NB	NS	ZO	PS	PB
PS	NS	ZO	PS		
PB		PS	PB		

Table 7. Quantize Variables(Fine Control)

e (Deg)	ė (Deg/sec)	ΔU (Volts)	Quantize Level
-0.4	-42.0	1.0	-5
-0.2	-33.6	-0.8	-4
-0.1	-25.2	-0.6	-3
-0.05	-16.8	-0.4	-2
-0.025	-8.4	-0.2	-1
0.0	0.0	0.0	0
0.025	8.4	0.2	1
0.05	16.8	0.4	2
0.1	25.2	0.6	3
0.2	33.6	0.8	4
0.4	42.0	1.0	5

Table 8. Look-up Table for Fine Control

Quantized Levels Linguistic Level	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
-5	-0.0	-0.0	-0.0	-1.0	-3.0	-5.0	-4.0	-3.0	-2.0	-1.0	-0.0
-4	-0.0	-0.0	-0.0	-1.0	-2.0	-4.0	-3.0	-2.0	-1.0	-1.0	-0.0
-3	-0.0	-0.0	-0.0	-1.0	-2.0	-3.0	-2.0	-1.0	-0.0	-0.0	-0.0
-2	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-2.0	-1.0	0	1.0	1.0	1.0
-1	-3.0	-2.0	-2.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	0	1.0	1.0	1.0
0	-5.0	-4.0	-3.0	-2.0	-1.0	0	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0
1	-4.0	-3.0	-2.0	-1.0	0	1.0	1.0	1.0	2.0	2.0	3.0
2	-3.0	-2.0	-1.0	0	1.0	2.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
3	-2.0	-1.0	0.0	1.0	2.0	3.0	2.0	1.0	0.0	0.0	0.0
4	-1.0	0.0	1.0	2.0	3.0	4.0	3.0	1.0	0.0	0.0	0.0
5	0.0	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	3.0	1.0	0.0	0.0	0.0