

퍼지추론을 이용한 DC 모터의 규칙기반 제어기 설계

김성중 최한수* 최종수 김영철 조훈**

전북대학교 * 조선대학교 ** 국방과학연구소

Design of Rule-Based Controller for DC Motor using Fuzzy Reasoning

S.J. Kim H.S. Choi* O.J.S. Choi Y.C. Kim H. Cho**

Chunbuk National University * Chosun University ** ADD

ABSTRACT

During the past several years, fuzzy control has emerged as one of the most active and fruitful areas for reaserch in the applications of fuzzy set theory. A key component of the fuzzy controller is a rule-based system which provides a linguistic description of control strategy. This strategy has the form of a collection of fuzzy conditional statements which are implemented and manipulated using fuzzy set theory. In this paper, we propose the rule-based controller for DC motor speed control. The result of performance compare with PID controller to verify the validity of proposed algorithm.

시스템의 정확한 동특성의 기술이 어려운 시스템에서 불확실성을 처리하는데 이용되어 왔다. Mamdani가 시스템의 동특성이 매우 비선형 특성이고 모델링이 어려운 Steam Engine 제어에 퍼지집합이론을 적용하여 양호한 결과를 얻은 이후 많은 응용 결과가 발표되었으며, 이 결과들은 규칙기반 제어기가 숙련된 human operator의 의사결정 능력에 필적하거나 능가함을 보여 준다.[3,4,5]

이 연구에서는 DC 모터의 속도제어를 위해서 퍼지추론을 이용한 규칙기반 제어기를 설계하였고, 여러가지 조건에서 모의 실험을 행하였다. 또한 설계한 제어기의 유용성을 입증하기 위해서 릴레이 동조실험을 통해 취득한 플랜트 정보(임계이득, 임계주기)를 이용하여 설계한 PID 제어기와 결과를 비교하였다.

1. 서 론

입출력관계에 있어서 정량적인 데이터를 이용할 수 없기 때문에 기존의 제어 방법으로는 만족할만한 결과를 얻을 수 없는 복잡한 산업공정들이 많이 있다. 그러나 숙련된 human operators는 복잡한 시스템을 정량적인 모델링 없이 매우 양호한 제어할 수 있다. 더우기, 많은 man-machine 시스템의 조작은 경험적 규칙, 직관적 지식, heuristics 등을 이용해야 한다. 이러한 경우에 퍼지추론을 기반으로한 규칙기반 제어(rule-based control)의 이용이 점점 증가하고 있다.

규칙기반 제어기의 설계는 인공지능(AI) 분야와 자동제어를 결합하여 유도된 새로운 방법론이다. 규칙기반 제어는 지능기계(intelligent machine)이론과 언어 제어(linguistic control)를 포함한 여러 분야에 역사적 근원을 두고 있으며, 사람의 의사결정과 제어의 속성을 병합하는 가장 적절한 방법이다.[1,2]

Zadeh가 퍼지집합 이론을 제창한 이래, 지난 20여년 동안 퍼지논리와 퍼지추론을 기반으로한 규칙기반 제어기는 퍼지집합 이론의 응용에 있어서 가장 활발한 연구분야 중의 하나로 부상하였다. 사람의 추론과 같이 근사적이고 정성적인 면을 기술하는데에 효과적인 규칙기반 제어기는 복잡한 시스템 또는

2. 규칙기반 제어기와 퍼지추론

2.1 규칙기반 제어기

규칙기반 제어기의 구조는 그림 1.과 같이 네 부분으로 되어 있다. 즉 퍼지화(fuzzification), 지식기반(knowledgebase), 퍼지추론(fuzzy reasoning), 비퍼지화(defuzzification)이다. 일반적으로 퍼지화는 입력변수값을 측정하여 입력변수값의 범위에 대응하는 전체 논집합으로 변환하는 scale mapping을 수행하며, 입력 데이터를 적절한 퍼지 집합 label의 언어값으로 변환하는 퍼지화 기능을 수행한다. 지식기반은 데이터 베이스와 규칙기반으로 구성되는데, 데이터 베이스는 퍼지 제어기에서 제어규칙과 퍼지 데이터 처리에 필요한 정의를 제공하고, 규칙기반은 전문가의 지식을 If-then형태의 퍼지 조건문(fuzzy conditional statements)으로 모아놓은 것이다. 퍼지추론은 퍼지 제어기의 핵심이라 볼 수 있으며, 사람의 의사결정 행위를 흉내내는 능력을 갖고 있고 퍼지 제어동작을 추론해낸다. 비퍼지화는 출력변수 값의 범위를 대응하는 전체 논집합으로 변환하는 scale mapping을 행하며, 추론한 퍼지 제어동작을 비퍼지(nonfuzzy) 제어동작으로 만들어내는 비퍼지화 기능을 수행한다.

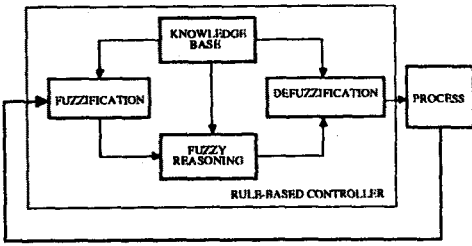


그림 1. 퍼지 규칙기반 제어기의 구조

전제 1 : x is A'
 전제 2 : If x is A then y is B

 결과 : y is B'

이러한 형태의 퍼지추론은 Zadeh에 의해서 제안된 추론의 합성 규칙(compositional rule of inference)에 기반을 둔다.

규칙기반 제어기(rule-based controller)는 퍼지추론을 이용하여 처리되는 퍼지 제어규칙으로 구성된다. 간단하게 다음과 같은 두 개의 규칙이 있다고 가정하면,

- R_1 : If x is A_1 and y is B_1 then u is C_1
- R_2 : If x is A_2 and y is B_2 then u is C_2

2.2 퍼지추론

최근 근사추론(퍼지추론)을 이용한 규칙기반 제어기는 퍼지 집합 이론의 응용에 있어서 가장 활발한 연구분야 중의 하나로 부각하였다. 추론은 불확실하고 부정확한 환경에서 합리적인 의사결정을 하는 사람의 능력에 중요한 역할을 한다. 근본적으로 근사추론은 부정확한 전제들로부터 부정확한 결론을 이끌어내는 과정이므로 퍼지논리를 이용하여 체계적으로 연구할 수 있다.

퍼지집합의 개념은 기존 집합(ordinary set or crisp set)의 확장이라고 생각할 수 있다. 퍼지집합에서, 원소는 0과 1사이에서 변화하는 멤버십 등급을 갖는 집합이다. 그러므로 전체 집합 $U = \{u_1, i=1, 2, \dots, n\}$ 에서 퍼지집합 F 는 멤버십 함수 $\mu_F : U \rightarrow [0,1]$ 로 정의된다. 만약 $\mu_F(u_i)$ 가 0이거나 1이면, 퍼지집합은 기존의 집합과 같다. 특별한 경우로서 퍼지 싱글톤(fuzzy singleton)은 멤버십 등급이 1인 단 한 개의 원소를 포함하는 퍼지집합이다.

퍼지집합에 관한 집합이론적 연산은 멤버십 함수에 의해서 정의된다. 예를들어 A 와 B 를 각각 멤버십 함수 μ_A 와 μ_B 를 갖는 전체집합 U 에서의 두 퍼지집합이라 하면, 합집합 $A \cup B$ 의 멤버십 함수 $\mu_{A \cup B}$ 와 교집합 $A \cap B$ 의 멤버십 함수 $\mu_{A \cap B}$ 는 모든 $u \in U$ 에 대해서 다음과 같이 정의한다.

$$\mu_{A \cup B}(u) = \max\{ \mu_A(u), \mu_B(u) \},$$

$$\mu_{A \cap B}(u) = \min\{ \mu_A(u), \mu_B(u) \}$$

만약 A_1, A_2, \dots, A_n 이 각각 U_1, U_2, \dots, U_n 에서의 퍼지집합이라면, A_1, A_2, \dots, A_n 의 Cartesian product는 다음과 같은 멤버십 함수를 갖는 product space $U_1 \times U_2 \times \dots \times U_n$ 에서의 퍼지집합이다.

$$\mu_{A_1 \times \dots \times A_n}(u_1, \dots, u_n) = \min\{ \mu_{A_1}(u_1), \dots, \mu_{A_n}(u_n) \}$$

퍼지집합 A, A', B, B' 이 x 와 y 의 언어값(linguistic values)이라고 가정하면, x 와 y 를 포함하는 퍼지추론의 예는 다음과 같다.

퍼지 추론은 사용자가 제공한 사실(user-supplied facts)과 규칙기반(rule base)사이의 부분적 매칭 정도를 계산한다. (A_1 and A)와 (B_1 and B)의 매칭 정도는

$$\alpha_1 = \max_u \min\{ \mu_{A_1}(u), \mu_A(u) \},$$

$$\beta_1 = \max_u \min\{ \mu_{B_1}(u), \mu_B(u) \}$$

이고, 1번째 규칙의 firing strength는

$$x_1 = \min\{ \alpha_1, \beta_1 \}$$

이다. 그러므로 1번째 규칙은 다음과 같은 제어 의사결정(control decision)을 만들어낸다.

$$\mu_{C_1}'(w) = \min\{ x_1, \mu_{C_1}(w) \}$$

다수의 규칙에 대한 결과는 각 규칙의 결과를 합집합 연산자로 종합하여 구할 수 있다. 종합한 결과는

$$\mu_C(w) = \max\{ x_1, \mu_{C_1}(w) \}$$

이다.

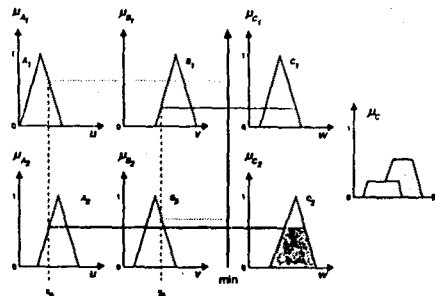


그림 2. crisp입력을 이용한 퍼지 추론과정.

온라인 처리에 있어서 제어 시스템의 상태변수는 제어 의사 결정에 필수적인 요소이고, 상태변수의 값들은 센서로부터 얻을 수 있으며 crisp 데이터이다. 이 데이터는 퍼지화를 통해서 퍼지집합으로 변환해야 한다. 그러나, 실제로 crisp 데이터는 퍼지 싱글톤으로 취급되며, 이 경우의 퍼지 추론과정을 그림 2.에 설명하였다. 이 추론을 통해서 얻은 결과들은 비퍼지화를 통해서 비퍼지 제어동작을 추론해낸다.

3. 제어기 설계 및 성능개선

3.1 규칙기반 제어기 설계

이 연구에서는 DC 모터의 속도제어를 위해서 PI-type의 규칙기반 제어기를 설계한다. 제어기의 입력력 변수는 다음과 같이 선정한다.

- 편차 : $e(k) = \text{setpoint} - \text{output}$
- 편차의 변화량 : $de(k) = e(k) - e(k-1)$
- 제어기 출력 : $du(k)$

여기에서 $du(k)$ 는 $e(k)$ 와 $de(k)$ 에 의해서 결정된다. 규칙기반 제어기의 지식기반은 앞서 언급한 바와 같이 데이터 베이스와 규칙기반으로 구성되어 있다. $e(k)$, $de(k)$, $du(k)$ 에 대한 데이터 베이스는 그림 3.과 같이 비교적 계산이 쉬운 삼각형 형태의 멤버십 함수로 선정하였다. 일반적으로 제어규칙은 숙련된 조작자의 경험에 기반을 두며 If-then 형태로 구성된다. 설계한 제어규칙은 overshoot와 정상상태 오차를 고려하여 설계하였으며, 표 1.에 나타났다. 여기에서 사용된 언어변수는 7개이며 다음과 같다.

- PB : Positive Big NB : Negative Big
- PM : Positive Medium NM : Negative Medium
- PS : Positive Small NS : Negative Small
- ZO : Zero

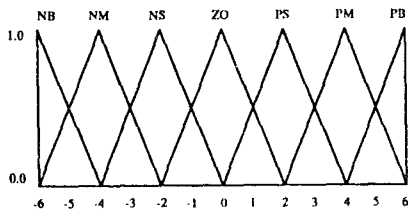


그림 3. 멤버십 함수

퍼지추론을 이용하였고, 비퍼지화(defuzzification) 방법으로는 퍼지 제어 가장 많이 쓰이고 있는 무게중심법(center of gravity method)을 이용하였으며 무게중심법은 다음과 같이 표현된다.

$$du = \frac{\sum_{i=1}^n \mu(w_i) \cdot w_i}{\sum_{i=1}^n \mu(w_i)}$$

여기에서 n 은 제어규칙의 수,

$\mu(w_i)$ 는 멤버십 함수,

w_i 는 멤버십 함수가 최대값을 갖을 때의 support값이다.

3.2 성능개선

표 2.의 look-up table은 다음과 같은 형태의 양자와 레플로 구성되어 있다.

$$DE(k) = F[E(k), DE(k)]$$

여기에서 F는 퍼지 관계를 의미한다.

추정된 편차 $e(k)$ 와 편차의 변화량 $de(k)$ 는 scaling factor

표 1. 퍼지 제어규칙

If e is PB and de is any then du is PB
If e is PM and de is PM then du is PM
If e is PS and de is PS then du is PS
If e is PS and de is ZO then du is PS
If e is ZO and de is ZO then du is ZO
If e is NS and de is NS then du is NS
If e is NS and de is ZO then du is NS
If e is NM and de is NM then du is NM
If e is NB and de is any then du is NB

표 2. Look-up table

Change in Error(DE)

	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6
-6	-6	-6	-6	-6	-6	-6	-6	-6	-6	-6	-6	-6	-6
-5	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-5
-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4
-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3
-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2
-1	-2	-2	-2	-2	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
0	-2	-2	-2	-1	0	0	0	0	0	1	2	2	2
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2
2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6

실시간 제어를 위해서 제어규칙을 표 2.의 look-up table로 정리하였다. look-up table와 하는 과정은 2.3 절에서 서술한

K_1 과 K_2 를 곱하므로써 전체 논의집합의 적당한 양자와 레벨 $E(k)$, $DE(k)$ 로 mapping되고,

$$E(k) = K_1 [e(k)],$$

$$DE(k) = K_2 [de(k)]$$

표 2.의 look-up table로 부터 양자화된 제어기 출력 $DU(k)$ 를 얻을 수 있다. 제어기 출력 $DU(k)$ 는 scaling factor K_3 를 곱하므로써 비퍼지 제어기 출력 $du(k)$ 로 된다.

$$du(k) = K_3 [DU(k)]$$

최종적으로 공정에 가해지는 제어입력 $u(k)$ 는 다음과 같은 속도 형태로 결정한다.

$$u(k) = u(k-1) + du(k)$$

이와 같은 방식으로 제어기의 입출력값을 결정하여 표 2.의 look-up table을 공정에 적용하면 양자와 레벨에 의한 편차 때문에 overshoot 및 정상상태 편차가 발생하게 되어 이를 보상하기 위한 대책을 세워야 한다. 보상방안은 여러가지가 있지만, 이 연구에서는 setpoint 인접영역에서 단지 scaling factor만을 변화시켜서 제어기의 성능을 개선하는 방법을 제시한다.

그림 3.과 같이 편차 $|e(k)| \geq A$ 이면 setpoint에 빨리 접근하도록 scaling factor I (K_1, K_2, K_3)을 선택하고, $|e(k)| < A$ 이면 overshoot 및 정상상태 편차를 최소화 하도록

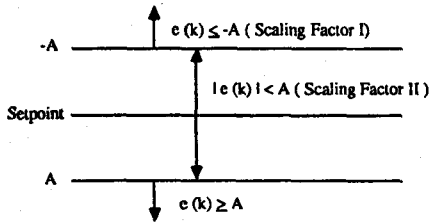


그림 3. Scaling factor 선택방식

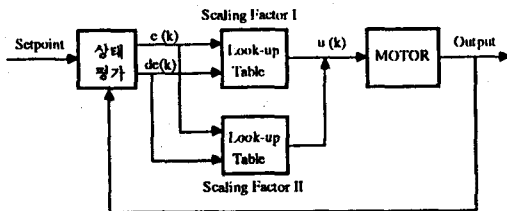


그림 4. 제한한 PI-type 규칙기반 제어기

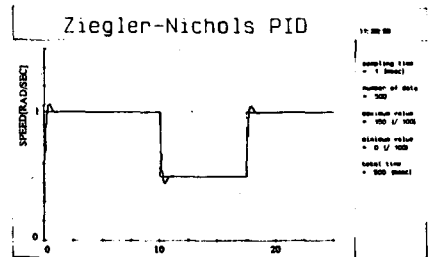
scaling factor II (K_1', K_2', K_3')를 선택한다. 그림 4.에 제안한 제어기의 블록선도를 제시하였다. 이와 같이 제어규칙 등을 수정하지 않고도 제어기의 추종성을 향상시킬 수 있고, overshoot 및 정상상태 편차를 최소화할 수 있다.

4. 모의실험 및 결과

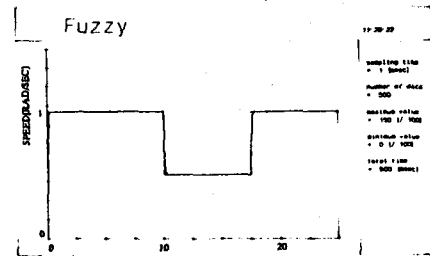
모의실험에 사용한 DC 모터의 전달함수는 다음과 같고, 입력과 출력에 대한 scaling factor I는 $K_1=K_2=4.8, K_3=0.0967$ 로, scaling factor II는 $K_1'=K_2'=30.0, K_3'=0.012$ 로 선택하였다. 또한, PID 제어기의 계수들은 Ziegler-Nichols의 임계값을 이용한 동조계수 결정방법으로 구하였다($K=2.69, T_1=0.15, T_d=0.0375$). [10]

$$G(s) = \frac{W(s)}{V(s)} = \frac{3.3}{S + 3.6}$$

모의실험 결과는 그림 5., 6., 7. 에 나타냈으며, 결과로부터 알 수 있듯이 제안한 규칙기반 제어기는 PID 제어기에 비해 overshoot가 없고, 정상상태에 빨리 도달한다. 또한 random noise (± 0.025) 및 외란(30%)를 투입한 경우에도 규칙기반 제어기는 PID 제어기 보다 setpoint를 잘 추종함을 알 수 있다.

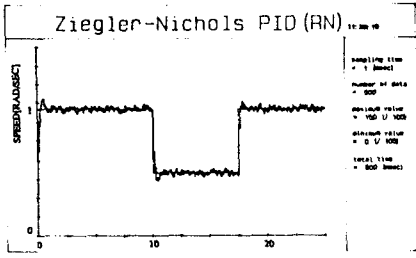


(a) PID 제어기

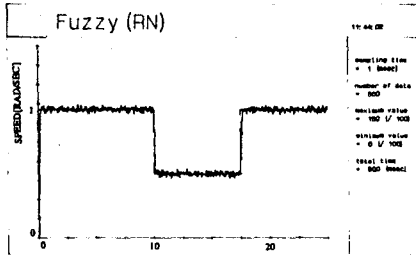


(b) 규칙기반 제어기

그림 5. 모의실험 결과



(a) PID 제어기



(b) 규칙기반 제어기

그림 6. Random noise를 투입한 경우의 결과

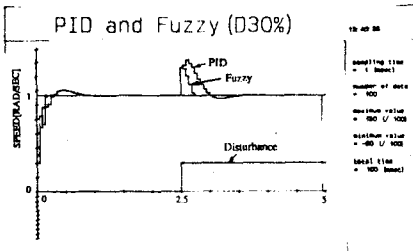


그림 7. 외란을 투입한 경우의 결과

5. 결 론

이 연구에서는 퍼지논리를 기반으로한 규칙기반 제어기를 설계하였다. 성능을 개선하기 위해서 scaling factor를 setpoint 인접영역에서 변화시켰다. 설계한 규칙기반 제어기를 DC 모터의 속도제어에 적용한 결과는 PID 제어기에 비해 overshoot가 없고 정상상태 도달시간이 짧음을 알 수 있었다. 또한 규칙기반 제어기는 random noise 및 외란을 투입한 경우에도 setpoint 추종능력이 우수하며 외란에 강인함을 입증하였다. 앞으로의 과제는 더욱 강인한 제어기를 설계하기 위해서 학습을 통한 규칙기반(rule base)을 구축하고 추론방법을 개선해야 할 것이다.

■ 참고 문헌

- [1] K.S. Fu, " Learning control systems and intelligent systems: An intersection of artificial intelligence and automatic control, " IEEE Trans. Automatic Control, Vol. AC-16, No.1, pp. 70-72, 1971.
- [2] E.H. Mamdani and S. Assilian, " A Fuzzy Logic Controller for a Dynamic Plant," Int.J.Man-Machine Studies, Vol.7, pp.1-13, 1975.
- [3] L. A. Zadeh, " Fuzzy Sets, "Information and Control, Vol.8, pp.338-353,1965.
- [4] C.C. Lee, " Fuzzy Logic in Control Systems : Fuzzy Logic Controller - Part I, " IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics, VI.SMC-20, No.2, pp.404-418, 1990.
- [5] C.C. Lee, " Fuzzy Logic in Control Systems : Fuzzy Logic Controller - Part II, " IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics, Vol.SMC-20, No. 2, pp.419-435, 1990.
- [6] Y.F. Li and C.C. Lau, " Development of Fuzzy Algorithms for Servo Systems," IEEE Control Systems Magazine, pp.65-71, April 1989.
- [7] W.H. Bare, R.J. Mulholland, and S.S. Sofer, " Design of a Self-Tuning Rule Based Controller for a Gasoline Refinery Catalytic Reformer," IEEE Trans. on Automatic Control, Vol.35, No.2, pp.156-164, 1990.
- [8] K.L. Tang and R.J. Mulholland, " Comparing Fuzzy Logic with Classical Controller Designs, " IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics, Vol. SMC-17, No.6, pp.1085-1087, 1987.
- [9] H.J. Zimmermann, " Fuzzy Sets Theory and Its Applications," Kluwer Academic Publisher, Boston, 1988.
- [10] 설 남 오, " 경험지식을 이용한 자동동조방법의 구현," 석사학위 논문, 전북대학교, 1991.