

퍼지로직을 이용한 지능제어 시스템의 알고리즘에 관한 연구

김 일¹⁾ · 李尙培²⁾

A study on the Algorithms of Intelligent Control System using Fuzzy Logic

Il Kim, Sang-Bae Lee

Abstract

In this study, proposed the theory and application of T-operators allowing to remodel the process of more generalized any decision-making to design more effective fuzzy control systems. Most of traditional fuzzy control systems and fuzzy inference algorithms have been designed by MIN and MAX operators. However, some relevant papers supported by theoretical backgrounds and experiments revealed that given the certain situations, other operators with better operation than the two traditional ones exist. Using the general concepts of T-operators to the fuzzy systems, this paper was proposed a general and flexible fuzzy inference model that the concepts of T-operators are applied to the traditional fuzzy inference algorithms. Through computer simulation studies, it was observed that for a given type of plants, fuzzy inference algorithms using the proposed T-operators perform better than means of MIN and MAX operators.

1) 한국해양대학교 전자통신학과 박사과정

2) 한국해양대학교 전자통신학과 부교수

제 1 장 서론

인간의 애매한 표현을 처리 할 수 있는 이론적인 바탕을 제공하는 것이 퍼지이론이다. 퍼지집합이론은 연구된 인간의 사고와 행동에 관련된 부정확함과 애매한 현상의 의미를 수학적으로 접근하여 증명하기 위해 시도되었으며 의학, 사회과학, 정보, 게임 및 제어 등의 여러 분야에서 응용되고 있으며 그 중 제어시스템에 대한 응용은 그들 중 가장 활발한 영역의 하나이다. 이 논문에서는 전통적 MIN과 MAX 오퍼레이터들에 추가하여 지능제어 시스템의 연구에서 근본적인 도구로써 사용할 수 있는 T-operators에 대해 연구하고 MIN과 MAX 오퍼레이터들을 이용한 전통적 퍼지추론 알고리즘에 T-operator들의 개념을 도입하여 의사결정 과정을 위한 일반적이고 유연한 퍼지추론 모델을 설계하였으며 제안된 퍼지추론 모델을 근거로한 퍼지제어알고리즘을 개발하였다. 그리고 이 알고리즘을 1차계 및 2차계 선형 및 비선형계의 제어대상에 적용시켜 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 제안된 T-operator들을 이용한 퍼지제어알고리즘의 효율성을 고찰하였다.

제 2 장 T-operators를 이용한 퍼지제어시스템

2.1 T-operators의 유형

지금까지 Zadeh의 T-operators는 가장 많이 알려져 있었으며, 그들은 퍼지 시스템의 연구에서 거의 독점적으로 사용되고 있다.

Zadeh의 T-operators는 아래와 같이 정의된다.

$$T_1(x, y) = \text{MIN}(x, y) \quad T_1^*(x, y) = \text{MAX}(x, y), \quad N_1(x) = 1 - x.$$

Weber, Bandler와 그리고 다른 사람들에 의해 확률적 연산자들이라 불리는 T-operators의 집합이 제시되고 연구되었으며 아래와 같다.

$$T_2(x, y) = xy, \quad T_2^*(x, y) = x + y - xy, \quad N_2(x) = 1 - x.$$

그리고 Lukasiewicz logics라 불리는 아래의 T-operators는 Giles에 의해 연구되어졌다.

$$T_3(x, y) = \text{MAX}(x + y - 1, 0) \quad T_3^*(x, y) = \text{MIN}(x + y, 1), \quad N_3(x) = 1 - x.$$

그리고 아래의 T-operators는 특별히 연구한 사람은 없지만 뒤에 나올 몇몇 다른 T-operators의 특별한 경우가 된다.

$$T_4(x, y) = \frac{xy}{x+y-xy}, \quad T_4^*(x, y) = \frac{x+y-2xy}{1-xy}, \quad N_4(x) = 1-x.$$

Weber와 그의 동료들은 다음과 같은 T-operators를 연구하였다.

$$T_5(x, y) = \begin{cases} x, & \text{if } y=1 \\ y, & \text{if } x=1 \\ 0, & \text{기타} \end{cases} \quad T_5^*(x, y) = \begin{cases} x, & \text{if } y=0 \\ y, & \text{if } x=0 \\ 1, & \text{기타} \end{cases}$$

$$N_5(x) = 1-x$$

Hamacher는 다음과 같은 T-operators를 제안하였다.

$$T_6(x, y) = \frac{\lambda xy}{1-(1-\lambda)(x+y-xy)}, \quad T_6^*(x, y) = \frac{\lambda(x+y)+xy(1-\lambda)}{\lambda+xy(1-\lambda)},$$

$$N_6(x) = 1-x.$$

Yager은 다음과 같은 T-operators를 제안하였다.

$$T_7(x, y) = \text{MAX}(1 - ((1-x)^p + (1-y)^p)^{1/p}, 0),$$

$$T_7^*(x, y) = \text{MIN}((x^p + y^p)^{1/p}, 1), \quad N_7(x) = 1-x.$$

Dombi는 다음과 같이 T-operators를 나타내었다.

$$T_8(x, y) = \frac{1}{1 + ((\frac{1}{x} - 1)^\lambda + (\frac{1}{y} - 1)^\lambda)^{1/\lambda}},$$

$$T_8^*(x, y) = \frac{1}{1 + ((\frac{1}{x} - 1)^{-\lambda} + (\frac{1}{y} - 1)^{-\lambda})^{-1/\lambda}},$$

$$N_8(x) = 1-x.$$

Dobois and Prade는 T-operators를 다음과 같이 정의하였다.

$$T_9(x, y) = \frac{x, y}{\text{MAX}(x, y, \lambda)}, \quad T_9^*(x, y) = 1 - \frac{(1-x)(1-y)}{\text{MAX}(1-x, 1-y, \lambda)},$$

$$N_9(x) = 1-x.$$

Weber은 T-operators를 다음과 같이 정의하였다.

$$T_{10}(x, y) = \text{MAX}\left(\frac{x+y-1+\lambda xy}{1+\lambda}, 0\right),$$

$$T_{10}^*(x, y) = \text{MIN}(x+y+\lambda xy, 1), \quad N_{10}(x) = \frac{1-x}{1+\lambda x}.$$

Yu Yandong는 T-operator를 다음과 같이 나타내었다.

$$T_{11}(x, y) = \text{MAX}((1+\lambda)(x+y-1) - \lambda xy, 0),$$

$$T_{11}^*(x, y) = \text{MIN}((x+y+\lambda xy), 1), \quad N_{11}(x) = 1-x.$$

여기서 각각의 T-operators에 따른 퍼지 합집합과 교집합의 소속함수는 차이가 있으며 이것은 퍼지제어기의 동작과 효율성 그리고 다른 의사 결정 과정에 영향을 줄 수 있다. 그리고 T_6 과 T_6^* , T_7 과 T_7^* , T_8 과 T_8^* , T_9 과 T_9^* , T_{10} 과 T_{10}^* , 그리고 T_{11} 과 T_{11}^* 의 매개 변수의 범위를 제한하면 T_1 과 T_1^* , T_2 과 T_2^* , T_3 과 T_3^* ,

T_4 과 T_4^* 그리고 T_5 과 T_5^* 의 어느 것과 대체될 수 있다.

2.2 T-operators를 기초로한 퍼지 추론 방법

고전적 퍼지 추론 방법에서 MIN과MAX 연산자들은 퍼지 교집합, 합집합 그리고 조건명제 함수와 추론의 합성 규칙을 위해 광범위하게 사용되었다. 그렇지만 실험적 연구에서 어떤 T-operators는 의사 결정 과정의 전후의 확실한 상황에서는 보다 나은 동작을 한다는 것을 제시하였다. 예를 들면 곱연산자 (T_2)는 MIN 연산자 (T_1)보다 나은 결과를 보였다. 사실 연산자의 선택은 항상 문제가 되었다. 그리고 이것은 모델이 되는 실세계 문제에 거의 의존하고 있다. 따라서 주어진 문제에 더 적합한 operators를 선택하기 위한 융통성과 선택성을 제공하기 위하여 의사 결정과정의 모델링에서 MIN과MAXoperator에 추가하여 T-operators의 일반적 개념을 사용하였다. 제어 규칙이 다음과 같이 주어졌다고 가정하자.

$$\bigcup_{i=1}^N \text{if } x \text{ is } A_i \text{ then } y \text{ is } B_i .$$

그리고 T-operators의 기호로 A_i 와 B_i 사이의 퍼지관계 $R_{A_i \rightarrow B_i}$ 을 표현하면 다음과 같다.

$$\mu_{R_{A_i \rightarrow B_i}}(x, y) = T(\mu_{A_i}(x), \mu_{B_i}(y)). \quad (2.1)$$

여기서 T는 T-norm이다. 식(2.1)은 실제로 일반화된 Mamdani의 조건명제 함수이다. 유사한 확장으로 다른 조건명제 방법들을 만들 수 있다. 이것은 의사 결정 과정을 구하기 위하여 특별한 조건 명제 방법을 선택하려는 사용자에게 도움을 줄 것이다. 조건명제 함수의 일반적 표현은 $f_{\rightarrow}(\cdot, \cdot)$ 으로 정의된다. 그러므로 $\mu_{R_{A_i \rightarrow B_i}}(x, y) = f_{\rightarrow}(\mu_{A_i}(x), \mu_{B_i}(y))$ 와 같이 표현 할 수 있다.

전체 퍼지 관계 R은 식(2.2)에 의해 구할 수 있다.

$$\mu_R(x, y) = \bigwedge_{i=1}^N T^*(\mu_{R_{A \rightarrow B}}(x, y)) \quad (2.2)$$

주어진 조건 A'(제어조건)와 퍼지 관계 R(전문지식) 결과 B'(제어동작)는 일반적 연역 추론의 형태로 추론된다. 그 결과 B'는 조건 A'와 추론의 합성 공식에 의한 퍼지 관계 R로부터 식(2.3)같이 추론된다.

$$\mu_{B'}(y) = \text{Sup}_x T(\mu_{A'}(x), \mu_{R_{A \rightarrow B}}(x, y)), \quad (2.3)$$

식 (2.2)와 (2.3)에 의해 일반화된 퍼지 추론 알고리즘은 아래와 같다.

$$\mu_{B'}(y) = \text{Sup}_x T(\mu_{A'}(x), \bigwedge_{i=1}^N T^*(T(\mu_{A'}(x), \mu_{B'}(y)))). \quad (2.4)$$

만일 $N=1$ 이면 식(2.4)는 식(2.5)와 같이 기술된다.

$$\mu_{B'}(y) = T(\alpha, \mu_B(y)), \quad \alpha = \text{Sup}_x T(\mu_{A'}(x), \mu_A(x)) \text{ 이다.} \quad (2.5)$$

식 (2.5)에서 T 대신 T_1 에서 T_5 까지를 사용하면 아래에 나타낸 것과 같은 5가지의 다른 퍼지 추론 방법들을 얻을 수 있다.

$$(1) \quad \mu_{B'} = \alpha \wedge \mu_B(y), \quad \alpha = \text{Sup}_x (\mu_{A'}(x) \wedge \mu_A(x)).$$

$$(2) \quad \mu_{B'} = \alpha \mu_B(y), \quad \alpha = \text{Sup}_x (\mu_{A'}(x) \mu_A(x)).$$

$$(3) \quad \mu_{B'} = \text{MAX}(\alpha + \mu_B(y) - 1, 0), \quad \alpha = \text{Sup}_x \text{MAX}(\mu_{A'}(x) + \mu_A(x) - 1, 0)$$

$$(4) \quad \mu_{B'}(y) = \frac{\alpha \mu_B(y)}{(\alpha + (1 - \alpha) \mu_B(y))}.$$

$$\alpha = \text{Sup}_x \frac{\mu_{A'}(x) \mu_A(x)}{(\mu_{A'}(x) + (1 - \mu_{A'}(x)) \mu_A(x))}.$$

$$(5) \quad \mu_{B'} = \begin{cases} \alpha, & \mu_B(y) = 1 \text{일 때} \\ \mu_B(y), & \alpha = 1 \text{일 때} \\ 0, & \text{기타} \end{cases}$$

$$\alpha = \begin{cases} \text{Sup}_x \mu_{A'}(x), & \mu_A(x) = 1 \text{일 때} \\ \text{Sup}_x \mu_A(x), & \mu_{A'}(x) = 1 \text{일 때} \\ 0, & \text{기타} \end{cases}$$

2.3 T-operators를 이용한 퍼지 제어 알고리즘

퍼지제어기는 제어될 공정에 대한 전문지식을 가진 조작자로부터 얻어진 언어적 제어문이나 규칙들로 구성된다. 다음과 같이 기술할 수 있다.

N개의 규칙을 가진 퍼지제어기는 전체적인 형태로 다음과 같이 표현된다.

$\bigcup_{i=1}^N$ if e is E_i 그리고 c is C_i then Δu is U_i .
 그 i번째 규칙은 전체 집합 $E \times C \times U$ 내에서 퍼지 관계 R_i 로 기술 할 수 있다. 그리고 그들의 소속함수는 다음과 같이 주어진다.

$$\mu_{R_i}(e, c, \Delta u) = f_{\rightarrow}(\mu_{E_i}(e), \mu_{C_i}(c), \mu_{U_i}(\Delta u)), \quad (2.6)$$

T로 T-norms를 T^* 로 T-conorms을 다시 표현하여 아래와 퍼지 추론 알고리즘을 유도 하였으며 전체 퍼지관계 R은 식(2.8)과 같다.

$$\mu_{R_i}(e, c, \Delta u) = T[\mu_{E_i}(e), \mu_{C_i}(c), \mu_{U_i}(\Delta u)] \quad (2.7)$$

$$\mu_R(e, c, \Delta u) = \bigcup_{i=1}^N T^*[\mu_{R_i}(e, c, \Delta u)]. \quad (2.8)$$

특별한 순간의 공정 입력의 변화 U' 는 다음과 같이 구할 수 있으며 식 (2.9)는 실제 추론의 합성 규칙의 일반화된 형태이다.

$$U' = E' \circ C' \circ R, \quad (2.9a)$$

$$\mu_{U'}(\Delta u) = \text{Sup}_{(e,c)} T[\mu_{E'}(e), \mu_{C'}(c), \mu_R(e, c, \Delta u)]. \quad (2.9b)$$

2.4 T-operators를 이용한 퍼지제어기

그림 2.1에 T-operators를 기초로 한 퍼지제어기의 블록도를 나타내었다. 아래의 제어 규칙의 집합은 일반 상식들을 기초로 한 제어기를 위해 제시하였다.

R_1 : If e is negative and c is negative then Δu is negative :

R_2 : If e is negative and c is positive then Δu is zero:

R_3 : If e is positive and c is negative then Δu is zero :

R_4 : If e is positive and c is positive then Δu is positive.

다음 퍼지 집합들은 위의 제어 규칙에 포함된 퍼지 개념을 표현하기 위해 사용되었다.

NE : negative error,

PE : positive error,

NC : Negative change in the error,

PC : positive change in the error,

NU : Negative change in the process input,

ZU : Zero change in the process input,

PU : Positive change in the process input.

이 퍼지 집합들에 대한 소속 함수들은 그림 2.2에서 정의하였다.

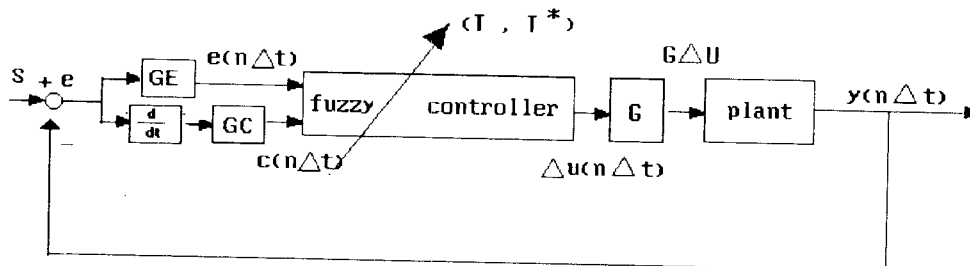


그림 2.1 T-operators에 의한 퍼지제어기의 블록도

행 응 답	1	2	3	4	5	6
시스템응답속도의 증가	T_3, T_3^*	T_1, T_1^*	T_2, T_1^*	T_3, T_1^*	T_4, T_1^*	T_5, T_1^*
	T_5, T_5^*	T_1, T_4^*	T_2, T_4^*	T_3, T_4^*	T_4, T_4^*	T_5, T_4^*
	T_2, T_2^*	T_1, T_2^*	T_2, T_2^*	T_3, T_2^*	T_4, T_2^*	T_5, T_2^*
	T_4, T_4^*	T_1, T_3^*	T_2, T_3^*	T_3, T_3^*	T_4, T_3^*	T_5, T_3^*
	T_1, T_1^*	T_1, T_5^*	T_2, T_5^*	T_3, T_5^*	T_4, T_5^*	T_5, T_5^*

표 3.1 25쌍의 T와T*의 시뮬레이션 결과

시스템이 대체로 부족제동의 상태로 되며 특히 비선형제어대상에 대하여 좋은 응답 특성을 가졌다. 일반적으로 어떤 제어대상이든 간에 T_5 과 T_5^* 를 이용한 퍼지제어시스템이 가장 나은 결과를 보였다. 그리고 T_1 과 T_1^* 을 이용한 것이 가장 뒤떨어 졌으며 다른 것들은 T_3 과 T_3^* 을 이용한 것을 제외하고는 중간 정도였다. 2행에서 6행까지의 결과로부터 각 행에 있는 제어대상 출력은 1행에서 보다는 각각 다른 것들과 유사해 진다는 것을 볼 수 있다.

T-norm $T_i(i=1,2,3,4)$ 이 더 작은 T-conorm과 함께 사용될 때 그 응답특성들은 더 빨라졌다.

제 4 장 결론

이 논문에서 T-operators의 이론을 조사하고 전통적 퍼지추론방법에서 이것의 응용 가능성을 찾아 효율적인 지능제어에 이용될 새로운 퍼지추론 알고리즘을 개발하였다. 그리고 연구된 오퍼레이터들은 퍼지제어시스템과 퍼지추론 기구의 설계에서 확장된 응용이 가능함을 제시하였다. 또한 MIN과 MAX 오퍼레이터들을 기초로한 전통적 퍼지추론방법을 고찰하고 개선 할 수 있는 새로운 오퍼레이터들과 이를 기초로한 새로운 퍼지추론방법들을 연구하였다.

이 연구에서 새로운 오퍼레이터들은 지능제어시스템 설계를 위한 퍼지추론 기구들의 설계에서 유용하게 응용됨을 알 수 있었다. 이 논문에서 제시한 T-operators를 기초로하여 퍼지추론 알고리즘들을 개발하고 이것의 효율성을 증명하기 위해 4가지 형태의 제어대상에 대한 퍼지제어시스템을 설계하여 컴

퓨터 시뮬레이션 연구를 통하여 응답속도, 안정상태 등에 대해 관찰하였으며 이것들을 이용한 퍼지제어시스템의 새로운 퍼지추론 알고리즘을 개발하는 과정에서 제안된 T-operators가 크게 유연함을 확인 하였다.

또 T-operators의 이론적 연구들과 제어대상의 변화에 대한 시뮬레이션 연구들을 근거로 의사 결정 문제에 대한 퍼지추론기구의 설계 고찰에서 제안된 T-operators는 MIN과 MAX 오퍼레이터들보다 우월하게 동작하며 특히 비선형제어대상에 대해서 이논문에서 연구한 T-operators 들 이용한 퍼지제어 알고리즘은 효율성이 있음을 실험 결과로써 나타 내었다.

참 고 문 헌

- [1] L.A.Zadeh, Fuzzy Sets, *Inform. and Cont.* Vol.8, pp.338-353, 1965.
- [2] 김인수, 김일, 이상배, 박희철, " 대형 공기 청정기에 이용될 퍼지 제어시스템의 설계" 1993년도 대한전자공학회 하계 종합 학술대회 논문집 vol.16, no.1, pp 566-567, 1993.
- [3] 이광형외, "퍼지이론 및 응용", 홍릉과학출판사, 1991.
- [4] L.A.Zadeh, Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Processes, *IEEE Trans. Systems Man Cybernet.*3, pp. 28-44, 1973.
- [5] E. Mamdani and S. Assilian, An Experiment in Linguistic Synthesis with a Fuzzy Logic Controller *Int.J.Man-Mach. Stud.* Vol. 7, pp.1-13, 1975.
- [6] 김일, 이상배, "T-operators에 기초한 Fuzzy Logic Controller의 설계 및 응용" 1994년도 한국퍼지시스템학회 추계학술대회 논문집, vol.4, no.2, pp 263-268, 1994.
- [7] A. Kaufmann and M.M. Gupta, *Fuzzy Mathematics Models in Engineering and Management Science*, North-Holland, Amsterdam , 1988.

