

자기 학습 능력을 가진 퍼지 제어기를 이용한 차량의 속도 제어기 개발

A SPEED CONTROLLER FOR VEHICLES USING FUZZY CONTROL ALGORITHM WITH SELF-LEARNING

정 승 현, 김 상 우*

*포항공과대학교 전자전기공학과(Tel: 279-5679; Fax: 279-5669; E-mail: jsh@alv.postech.ac.kr)

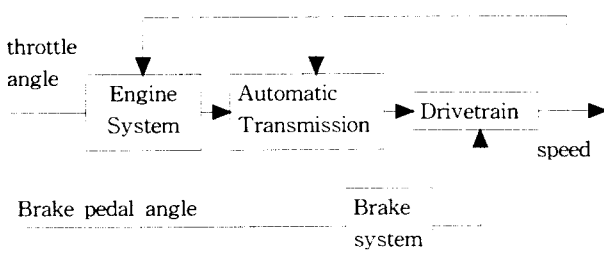
Abstract This paper suggests a speed control algorithm for the ICC(Intelligent Cruise Controller) system. The speed controller is designed using the fuzzy controller which shows the good performance in nonlinear system having the complex mathematical model. The fuzzy controller was equipped with the capability of a self-learning in real time in order to maintain the good performance of the speed controller in a time-varying environment. The self-learning properties and the performance of the fuzzy controller are showed via computer simulation. The suggested fuzzy controller will be applied to the PRV-III which is our test vehicle.

Keyword speed controller, acceleration control mode, speed regulation mode, self-learning, performance index, interior penalty method

1. 서론

자동차 산업의 발달과 인간의 욕구 증대로 최근 무인 차량에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 본 논문에서는 무인 차량의 연구분야중 하나인 자동 순항 제어기(ICC : Intelligent Cruise Controller)에 사용할 차량의 속도 제어기에 관한 연구를 다루고 있다. 자동 순항 제어기란 인간의 도움없이 차량의 종적 제어(Longitudinal Control)를 자동적으로 수행하는 제어기를 의미한다. 본 연구에서는 자동 순항 제어기 개발의 기초 단계로 차량 속도 제어기를 개발하였다.

이 연구에서는 차량을 보다 효율적으로 제어하고 여러 주위 환경의 변화에 대한 강인성을 얻기 위해 자기 학습 능력을 가진 fuzzy 제어기로 차량 속도 제어기를 설계하였다. fuzzy 제어기는 Ryu Katayama[1]가 제시한 fuzzy 제어기를 기초로 설계되었다.



[그림 1] 차량 모델
[Fig. 1] Model of Vehicle

2. 차량 모델

설계한 fuzzy 제어기의 모의 실험을 위하여 D. Cho[2]가 제시한 방법을 기초로 하여 차량을 모델링하였다. 모델은 비선형 시스템으로 구현하여 실제 차량의 비선형 특성을 나타 내었고, 외란에 대한 제어기의 성능을 평가하기 위해 도로 경사각에 대한 영향도 포함시켰다

차량 모델의 입력은 엔진 시스템의 throttle 밸브의 각과 brake 시스템의 pedal 각이며 출력은 차량의 속도이다.

3. 속도 제어기 구조

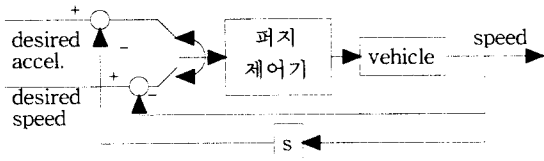
속도 제어기는 크게 '가속도 제어 모드(Acceleration Control Mode)'와 '속력 조절 모드(Speed Regulation Mode)'를 가지고 있다. 2개의 모드를 통해 속도 제어기는 원하는 속력과 그 속력에 도달하는 시간(가속도)을 동시에 제어할 수 있다. 두 모드간의 전환은 식(1)의 margin값과 식(2)의 error값에 의해 결정된다.

$$margin = (\text{원하는속력}) \times \frac{5}{100} \quad (1)$$

$$error = (\text{원하는속력}) - (\text{현재속력}) \quad (2)$$

만약, $|error| \geq margin$ 을 만족하면 속도 제어기는 가속도 제어 모드로 동작하고 $|error| < margin$ 을 만족하면 속도 조절 모드로 동작하게 된다. 가속도 모드에서의 속도 제어기의 입력은 원하는 가속도(Desired acceleration)이며 피드백 변수는 차량의 현재 가속도이며 이는 현재 속력을 미분하여 구한다. 그리고, 속

력 조절 모드에서는 원하는 속도(Desired speed)를 입력으로 차량의 현재 속도를 피드백 변수로 한다.



[그림2] 속도 제어기 구조

[Fig. 2] The structure of Speed controller

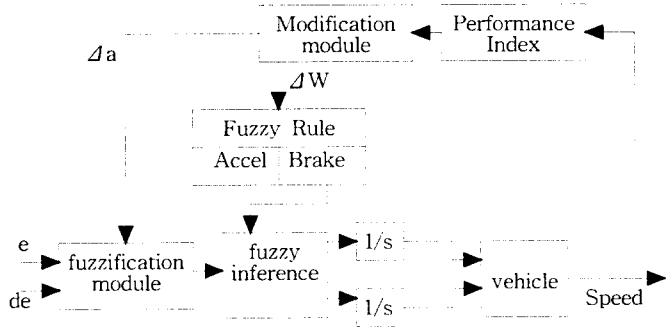
속도 제어기의 제어 대상인 차량 시스템은 비선형성이 크고 차량의 무게나 도로 경사각등의 외란이 많아 이런 특성에 적합한 제어기를 설계하여야 한다.

4. Fuzzy 제어기

4.1 Fuzzy 제어기 구조

Fuzzy 제어기는 Fuzzy Rule과 퍼지화 모듈, Fuzzy 추론, 자기 학습으로 구성되어 있다. Fuzzy 제어기의 입력은 error값과 derror/dt값이며, 출력은 차량 엔진의 throttle각과 brake pedal 각이다. 따라서, 2개의 입력과 2개의 출력을 가진 MIMO system을 형성한다.

앞에서도 언급했듯이 속도 제어기는 2개의 모드를 가지고 있기 때문에 Fuzzy 제어기는 이 2개의 모드에서 동작할 수 있도록 설계하였다. 이를 위해 2개의 모드에 대해 각각 서로 다른 fuzzy 집합 소속함수(membership function)와 fuzzy rule을 정의하였다. 그리고, 각 모드 내에서도 throttle system과 brake system의 특성상의 차이로 인해 각 system에 대해 다른 fuzzy 집합 소속함수와 fuzzy rule을 적용시켰다.



[그림3] Fuzzy 제어기 구조

[Fig. 3] The structure of Fuzzy Controller

4.2 Fuzzy 제어기 설계

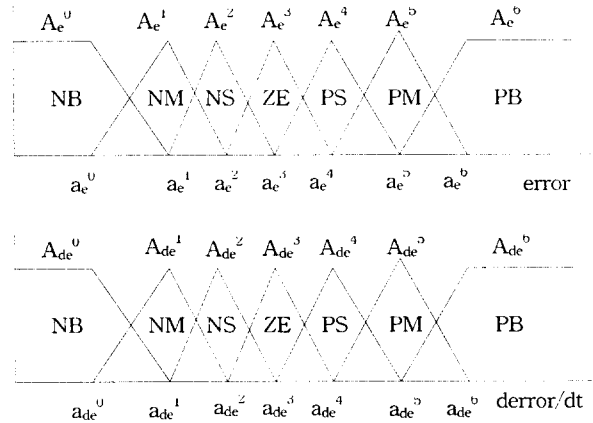
4.2.1 Fuzzy 집합

fuzzy 제어기의 입력인 error값과 derror/dt값에 대해 각각 7개

의 fuzzy 집합을 정의하였다. 그림4는 이들 7개의 fuzzy 집합 (NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB)을 도식화하고 있다.

각 fuzzy 집합은 $(a_e^0, a_e^1, \dots, a_e^6)$ 과 $(a_{de}^0, a_{de}^1, \dots, a_{de}^6)$ 에 의해 구분되며, 이 값들간의 관계는 식(3)에 의해 만족되어야 한다.

$$\begin{aligned} a_e^0 < a_e^1 < a_e^2 < a_e^3 < a_e^4 < a_e^5 < a_e^6 \\ a_{de}^0 < a_{de}^1 < a_{de}^2 < a_{de}^3 < a_{de}^4 < a_{de}5 < a_{de}^6 \end{aligned} \quad (3)$$



[그림4] Fuzzy 집합과 소속 함수

[Fig. 4] Fuzzy Sets and Membership Function

각 fuzzy 집합에 대한 소속함수는 그림4와 같이 정의되며, 그 값은 식(4)에 의해 계산된다.

$$A_j^i(x_j) = \begin{cases} 1 - \frac{a_j^i - x_j}{a_j^i - a_j^{i-1}}, & a_j^{i-1} < x_j \leq a_j^i \\ 1 - \frac{x_j - a_j^i}{a_j^{i+1} - a_j^i}, & a_j^i < x_j \leq a_j^{i+1} \\ 0, & x_j \leq a_j^{i-1}, a_j^{i+1} < x_j \end{cases} \quad (4)$$

4.2.2 Fuzzy rule

자기 학습의 결과에 따른 fuzzy rule 조정(modification)의 복잡성을 피하기 위해, rule의 형태를 sugeno fuzzy 모델의 rule을 사용하였다. 이 모델에서는 출력값 계산을 위한 비퍼지화 과정이 필요하지 않으므로, fuzzy rule 조정 알고리즘을 설계하기가 용이해진다.

rule의 개수는 fuzzy 제어기의 두 입력에 대해 각각 7개의 fuzzy 집합이 정의되어 있으므로, 모두 49개이다. fuzzy rule을 언어적 형태로 나타내면 다음과 같다.

RULE #(l+m) : IF Error is NB and (dError/dt) is PS
THEN Δ throttle_angle is W_{lm}^a and Δ brake_anle is W_{lm}^b .

fuzzy 제어기의 출력이 throttle 각과 brake pedal 각이므로 각 rule들은 두 개의 출력값을 설정하고 있다.

fuzzy rule들은 fuzzy 제어기상에서 행렬(matrix) 형태를 취하

며 fuzzy 추론 과정에 이 형태로 사용되었다.

[표 1] Fuzzy Rule의 행렬 형태

[Table 1] Matrix form of Fuzzy rule

de \ e	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	W ₀₀	W ₀₁	W ₀₂	W ₀₃	W ₀₄	W ₀₅	W ₀₆
NM	W ₁₀	W ₁₁	W ₁₂	W ₁₃	W ₁₄	W ₁₅	W ₁₆
NS	W ₂₀	W ₂₁	W ₂₂	W ₂₃	W ₂₄	W ₂₅	W ₂₆
ZE	W ₃₀	W ₃₁	W ₃₂	W ₃₃	W ₃₄	W ₃₅	W ₃₆
PS	W ₄₀	W ₄₁	W ₄₂	W ₄₃	W ₄₄	W ₄₅	W ₄₆
PM	W ₅₀	W ₅₁	W ₅₂	W ₅₃	W ₅₄	W ₅₅	W ₅₆
PB	W ₆₀	W ₆₁	W ₆₂	W ₆₃	W ₆₄	W ₆₅	W ₆₆

(∴ W_{lm} : fuzzy rule의 출력값, Throttle angle 이나 brake pedal angle)

4.2.3 Fuzzy 추론

fuzzy 추론은 시간 nT에 대해 fuzzy 제어기의 입력에 대한 최적의 출력을 계산한다. 이를 위해 각 fuzzy rule의 함축도(implication)을 식(5)에 의해 계산하고, 이를 가중치로 삼아 식(6)에 따라 출력 변화치를 계산하게 된다.

$$\mu_n = A_e^i(x_e) \cdot A_{de}^j(x_{de}), \quad n: \text{number of rule} \quad (5)$$

(∴ i, j = 0, 1, ..., 6)

$$\Delta Y_a = \frac{\sum_l \sum_m \mu_{(l+m)} \cdot W_{lm}^a}{\sum_l \sum_m \mu_{(l+m)}} \quad (6)$$

$$\Delta Y_b = \frac{\sum_l \sum_m \mu_{(l+m)} \cdot W_{lm}^b}{\sum_l \sum_m \mu_{(l+m)}} \quad (6)$$

$$\sum_l \sum_m \mu_{(l+m)} = 1 \quad (7)$$

식(7)은 fuzzy 집합과 소속도 함수의 정의에 의해 항상 성립된다. 최종적으로 차량에 전달되는 출력은 식(8)에 의해 계산되며 여기서 액츄에이터 선택자(Actuator selector)는 시간 (n+1)T에 대해 어느 액츄에이터(throttle system과 brake system)를 사용할 것인지를 나타 내며, 이는 식(9)에 의해 이루어진다.

$$Y_a(n+1) = \frac{1+SEL}{2} \cdot (Y_a(n) + \Delta Y_a)$$

$$Y_b(n+1) = \frac{1+SEL}{2} \cdot (Y_b(n) + \Delta Y_b) \quad (8)$$

(∴ SEL : Actuator selector)

$$SEL = \begin{cases} 1, & \text{if } Y_b(n) + \Delta Y_b < 0 \\ -1, & \text{if } Y_a(n) + \Delta Y_a < 0 \end{cases} \quad (9)$$

4.2.3 자기 학습(Self-Learning)

자기 학습을 하기 위해서 fuzzy 제어기의 능률을 평가할 수 있는 성능 지수(Performance Index)가 필요하다. 이 성능 지수를 계산하기 위해 차량의 출력 오차값(가속도 오차값(가속도 제어 모드일 경우)이나 속력 오차값(속력 조절 모드일 경우))을 fuzzy 제어기의 출력값의 오차로 변환시키는 알고리즘이 필요하다.

여기서는 차량의 출력 오차값과 fuzzy 제어기의 출력 오차값의 관계를 선형 관계로 생각하였다. 식(10)은 이를 수식화한 것이다.

여기서, error값과 derror/dt값을 동시에 고려함으로써 학습과 다(overlearning)에 의한 차량 출력값의 진동을 방지하였다.

$$m = error + wt \cdot \frac{derror}{dt}$$

(∴ wt : weight factor)

$$PI = \begin{cases} 1 & , m \geq TH_p \\ \frac{2}{TH_p - TH_n} & , TH_n < m < TH_p \\ -1 & , m \leq TH_n \end{cases} \quad (10)$$

(∴ PI : Performance index)

자기학습의 대상은 소속함수와 fuzzy rule이며 소속함수는 (a_e⁰, a_e¹, ..., a_e⁶)과 (a_{de}⁰, a_{de}¹, ..., a_{de}⁶)을 조정하고 fuzzy rule은 출력값 W를 조정하여 자기 학습을 한다. 자기 학습 방법은 비용 함수(cost function)에 fuzzy 집합간의 순서 유지를 위하여 식(3)의 등식을 제한조건을 첨가하여 이를 강하 연산(gradient method)을 취하는 내부벌칙 방법(Interior Penalty Method)을 사용하였다. 이는 학습 결과에 따른 fuzzy 집합간의 순서 변화를 방지할 수 있다. 이를 식(11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\vec{a} = (a_j^0, a_j^1, \dots, a_j^6), \quad j = e, de$$

$$\vec{g}(\vec{a}) = (a_j^1 - a_j^0, a_j^2 - a_j^1, \dots, a_j^6 - a_j^5) \quad (11)$$

$$P(\vec{a}) = PI + \lambda \cdot \Phi(\vec{g}(\vec{a})), \quad \lambda : \text{learning step rate}$$

여기서 Φ 는 식(12)을 만족시키는 함수이다.

$$\Phi(\vec{g}(\vec{a})) > 0 \quad \text{as } \vec{a} \in \text{Interior of } Z$$

(∴ Z = { a | g(a) < 0 })

$$\Phi(\vec{g}(\vec{a})) \rightarrow \infty \quad \text{as } \vec{a} \rightarrow \delta Z \quad (\therefore \text{Boundary of } Z)$$

(12)

식(11)의 비용 함수 P를 강하 연산하면, 그 값은 학습 정도를 나타내게 된다. 자기 학습은 학습 정도에 따라 소속 함수나 fuzzy rule을 조정하므로써 이루어지게 된다.

$$a_j^i(n+1) = a_j^i(n) + \alpha \cdot \frac{\partial P}{\partial a_j^i}$$

$$W_{lm}^*(n+1) = W_{lm}^*(n) + \beta \cdot \frac{\partial P}{\partial W_{lm}^*} \quad (13)$$

$$\begin{cases} \therefore j = e, de \\ k = a, b \\ \alpha, \beta = \text{constant} \\ i, l, m = 0, 1, \dots, 6 \end{cases}$$

5. 모의 실험 및 결과

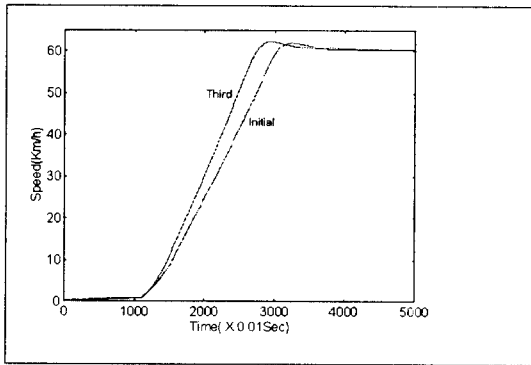
모의 실험상에서의 제어 주기는 0.2초로 하여 fuzzy 제어기의 자기 학습 능력과 환경 변화(도로의 경사각 변화)에 따른 강인성

의 능력을 알아 보았다.

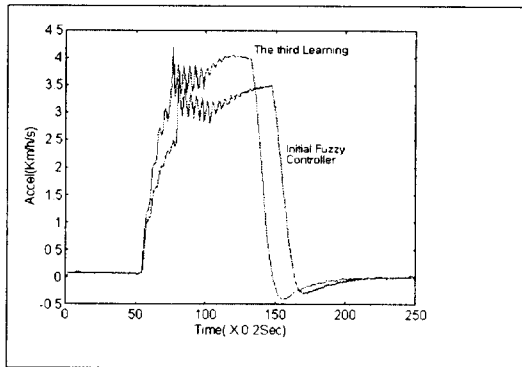
그림5와 그림6은 시간 10초에 fuzzy 제어기에 원하는 가속도를 4Km/h/s로 하고 원하는 속력을 60Km/h로 하였을 때의 결과이다. 하나의 그래프는 초기의 fuzzy 제어기의 출력 결과이며 다른 하나는 3번의 자기 학습후의 fuzzy 제어기의 출력 결과이다. 그림5은 차량의 속력을 나타 내고, 그림6은 차량의 가속도를 나타 내고 있다. 그림5과 그림6에서 보듯이 '가속도 제어 모드'에서 출력상에 약간의 진동이 존재하지만 3번의 자기 학습의 결과로 제어기의 성능이 향상됨을 알 수 있다.

그림7은 초기의 fuzzy 집합의 소속 함수를 나타 내고 있고, 그림8은 3번의 자기 학습에 따른 변화된 fuzzy 집합을 보여 주고 있다. fuzzy 집합에서 처음 두 개의 fuzzy 집합의 소속 함수는 '가속도 제어 모드'에 사용되는 것이고, 나머지는 '속력 조절 모드'에 사용되는 것들이다.

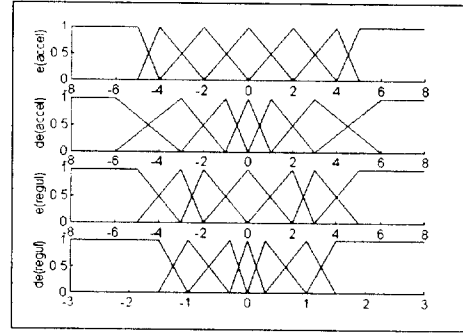
모의 실험 결과에서 fuzzy 제어기의 자기 학습 능력과 환경 변화에 대한 강인성이 우수함을 나타 내었다. Performance Index 계산에서 차량 속도이나 가속도상의 진동을 적절히 고려하여 이를 수식으로 나타 낼 수 있다며 더욱 좋은 성능을 나타낼 것이다. 현재 이것을 위해 Performance Index 계산 알고리즘을 보강하고 있으며, 향후에는 fuzzy 제어를 실차에 적용시켜 실험하려 한다. 이 실험이 끝난 후 설계된 fuzzy 제어기는 ICC system에 장착된다.



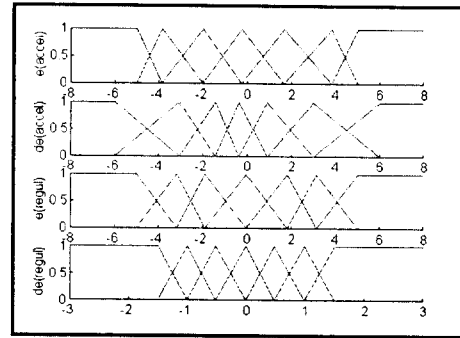
[그림 5] 학습 회수에 따른 제어기 성능 비교(속력)
[Fig. 5] the performance(speed) of controller



[그림 6] 학습 회수에 따른 제어기 성능 비교(가속도)
[Fig. 6] The performance(Acceleration) of controller



[그림 7] 초기 fuzzy 집합의 소속 함수
[Fig. 7] Initial Membership function



[그림 8] 3회 학습시 fuzzy 집합의 소속 함수
[Fig. 8] Membership function at the third learning

참고 문헌

- [1] Ryu Katayama, Yuji Kajitani, and Yukiteru Nishida, "A Self Generating and Tuning Method for Fuzzy Modeling using Interior Penalty Method", Proc. of the 2nd International Conference on Fuzzy Logic and Neural Networks (IIZUKA'92, Iizuka, Japan, July 17-22, pp.357-360, 1995)
- [2] D.Cho, J.K.Hedrick, "Automotive Poertrain Modeling for Control", Trans. of the ASME, VOL.111, pp.568-576, 1989
- [3] Mokhtar S.Bazaraa, Hanif D.Sherali, *Nonlinear Programming*, John Wiley & Sons Inc, 1992
- [4] Sujeet Sheno, Kav도 Ashenayi, "Implementation of a Learning Fuzzy Controller", IEEE control system, June, pp.73-80, 1992
- [5] P. Ioannou and Z. Xu, "Throttle and Brake Control systems for Automatic Vehicle following", IVHS Journal, VOL.1(4), pp.345-377, 1994

* 본 논문은 국방과학 연구소와 현대 자동차의 연구비 지원에 의한 연구 결과의 일부입니다.