

자기 조절 기능을 갖는 퍼지 지능 순항 제어기 개발

이 구도, 김 상 우
포항공과대학교 전자전기공학과

A Fuzzy Intelligent Cruise Controller using a Self-tuning Method

Gu Do Lee, Sang Woo Kim

Dept. of Electronic and Electrical Eng., POSTECH

Abstract - In this paper, we present a fuzzy ICC using a self-tuning method. To provide robustness and adaptiveness over the vehicle nonlinearities and changes of the driving environments, an on-line self-tuning scheme based on 'Interior Penalty Function' was developed. Road test and computer simulation results verify the feasible performance of the suggested ICC algorithm.

Keywords - ICC, headway controller, fuzzy controller, self-tuning, interior penalty function

1. 서 론

지능 순항 제어기(Intelligent Cruise Controller)란 최근 활발히 진행되고 있는 무인 차량에 대한 연구 중 한 분야로서 각종 제어 기법과 센서 시스템을 통해 차량의 종적 제어를 수행함으로써 운전자의 편리함과 안전성을 높이고, 아울러 교통 흐름을 원활히 하는데 그 목적을 두고 있다.

지금까지 PID, 최적 제어 및 슬라이딩 모드 제어 등을 이용한 많은 지능 순항 제어기가 제안되었지만 차량의 비선형성과 운행 환경 변화에 대한 적응성 및 안정성을 보장할 수 없다는 문제점을 보이고 있다.

본 연구에서는 퍼지 알고리즘을 이용하여 차량의 비선형성을 효과적으로 고려하였으며, 또한 온-라인 자기 조절 기능을 추가하여 각종 운행 환경 변화에 대한 강인성 및 적응성을 증대시킨 지능 순항 제어기를 제안한다. 자기 조절 기능은 Ryu Katayama가 제시한 내부 벌칙 함수를 이용한 오프-라인 자기 조절 방법을 실시간 제어에 이용할 수 있는 온-라인 형태로 수정하여 사용하였다.

2. 본 론

본 논문에서 제안하는 지능 순항 제어기는 크게

전방 제어기와 속도 제어기로 구성되었다. 전방 제어기에서 최적의 속도 및 가속도 명령을 생성하여 속도 제어기로 전달되면 속도 제어기는 퍼지 제어 알고리즘을 이용하여 차량의 속도 및 가속도를 제어하게 된다. 퍼지 제어 알고리즘은 차량 및 주행 환경 변화에 적응하기 위하여 내부 벌칙 함수를 이용한 자기 조절 기능을 이용하여 소속도 함수와 퍼지 룰을 조정하게 된다.

2.1 차량 모델

차량 모델의 입력은 엔진의 스로틀 밸브의 각과 브레이크 페달의 각이며 출력은 차량의 속도이다. 모델은 D.Cho가 제시한 방법을 기초로 하여 모델링하였다. 완성된 모델의 모의 실험을 통하여 조절된 소속도 함수와 퍼지 룰을 실차 실험에서의 초기값으로 사용하였다.

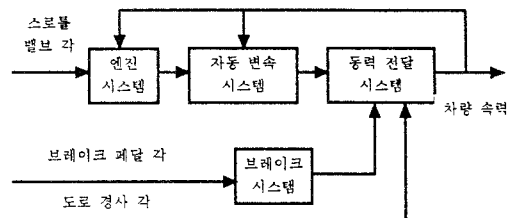


그림 1. 차량 모델

2.2 지능 순항 제어기

본 논문에서 제시한 지능 순항 제어기는 그림 2에서 보듯이 크게 “전방 제어기(Headway Controller)”와 “속도 제어기(Speed Controller)”로 구성되어 있다.

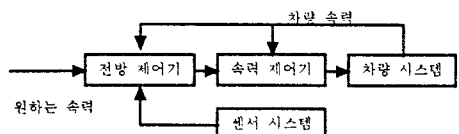


그림 2. 지능 순항 제어기 구조

전방 제어기란 앞 차량과의 거리, 상대 속도와 같은 전방 정보를 이용하여 속도 제어기에 최적의 속도 명령을 전달하는 제어기이다. 이렇게 전방 제어기로부터 주어진 속도 명령에 따라 속도 제어기는 차량의 속도를 제어하게 된다. 본 논문에서 속도 제어기는 비선형 제어에 뛰어난 퍼지 제어 알고리즘을 이용하였고, 레이저 센서를 이용하여 전방 정보를 획득한다.

2.2.1 전방 제어기

전방 제어기는 센서 시스템으로부터의 전방 정보를 이용하여 최적의 속도와 가속도를 속도 제어기에 전달하여 앞 차량의 속도로 실험 차량의 속도를 동기화 시킨다. 만약 전방에 장애물이 없을 경우는 차량의 속도 명령을 운전자의 원하는 속도로 한다. 이러한 전방 제어기는 “속도 제어 모드”, “전방 제어 모드”, 그리고 “경보 모드”로 이루어져 있으며 모드간의 선택은 그림 3의 그래프에 의해 이루어진다.

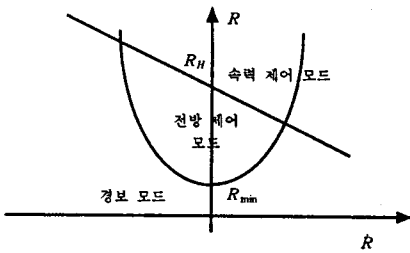


그림 3. 전방 제어기 모드 선택

그림 3의 직선과 포물선의 방정식은 (1), (2)와 같다

$$R_H = T \cdot \dot{R} + R \quad (1)$$

R_H : 최적 상대 거리 R : 상대 거리
 \dot{R} : 상대 속도 T : 전방 제어 시상수

$$R = \frac{1}{2 \cdot a_{\min}} \cdot \dot{R}^2 + R_{\min} \quad (2)$$

R_{\min} 은 앞 차량과의 최소 상대 거리, a_{\min} 은 차량의 최대 감속 능력을 나타낸다. 그림 3의 그래프에서 전방 정보(R, \dot{R})에 따라서 모드가 결정되며, 전방 제어 모드에서는 1차 전방 제어 알고리즘을 사용한다. 1차 전방 제어 알고리즘은 (3)과 같이 나타난다.

$$V_c = V_p + \frac{R - R_H}{T}$$

$$V_p = V_a + \dot{R}$$

$$R_H = V_a \cdot T_H + R_{\min} \quad (3)$$

V_p : 앞 차량 속도 V_a : 실험 차량 속도
 R_H : 전방 거리 V_c : 속도 명령
 T_H : 전방 거리 상수 R_{\min} : 최소 전방 거리

2.2.2 속도 제어기

속도 제어기는 전방 제어기로부터 주어진 속도 명령과 가속도 명령에 따라 차량의 속도를 제어하게 된다. 속도 제어기는 크게 가속도 제어기와 속도 조절기로 구성되며 이들간의 선택은 그림 4와 같이 속도 명령과 현재 차량의 속도의 차이에 의해 결정된다.

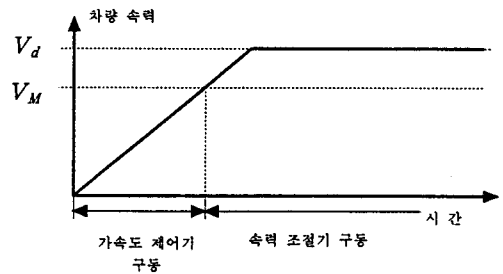


그림 4. 속도 제어기 구동 방법

그림 4에서 V_d 는 속도 명령이고, V_M 은 (4)에 의해 정의된다. 전방 제어기로부터의 속도 명령과 현재 속도의 차이를 e 라고 하면, $|e| \geq M$ 이면 가속도 제어가 작동하며, $|e| < M$ 이면 속도 조절기가 작동한다.

$$M = V_d \cdot \frac{5}{100}$$

$$V_M = V_d - M \quad (4)$$

속도 제어기의 전체 구조는 그림 5와 같다. 제어기 선택자에 의해 가속도 제어기와 속도 조절기 중 하나의 제어기를 선택하고, 선택 정보는 출력 선택자로 전달된다. 여기서 출력은 스톱을 밸브의 위치 값이나, 브레이크 페달의 위치값이다.

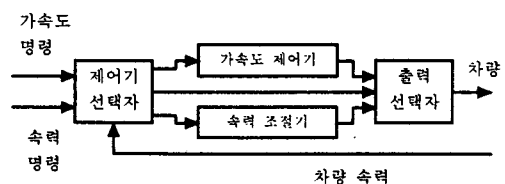


그림 5. 속도 제어기 구조

본 논문에서는 비선형 제어에 적합한 퍼지 제어 알고리즘에 각종 도로 환경이나 차량의 상태 변화에 적용할 수 있도록 내부 벌칙 함수를 이용한 자기 조절 기능을 첨가하여 속력 제어기를 구성하였다.

2.3 퍼지 제어 알고리즘

퍼지 제어 알고리즘은 속력 제어기의 가속도 제어기와 속력 조절기에 사용되며, 가속도 제어기와 속력 조절기는 각각 다른 퍼지 소속도 함수와 퍼지 룰을 갖는다. 퍼지 제어기의 전체 구조는 그림 6에서 보이고 있다.

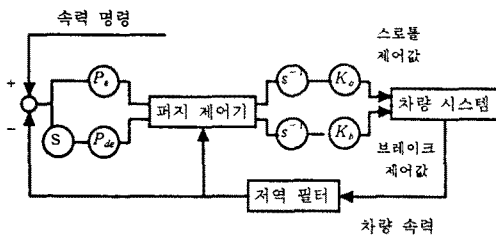


그림 6. 퍼지 제어기의 전체 구조

퍼지 제어기의 입력인 오차값(e)과 오차 변화율(\dot{e})은 입력 이득 P_d 와 P_{de} 에 의해 $[-1 \ 1]$ 사 이 값으로 변환된다. 그리고 퍼지 제어기의 출력값의 범위는 $[-1 \ 1]$ 이며, 이 값은 출력 이득 K_a 와 K_b 에 의해 물리적 범위의 값으로 변환된다. 이러한 퍼지 제어기는 차량 변수나 주위 환경 변화에 효과적으로 대처하기 위하여 자기 조절 기능을 갖추고 있으며, 자기 조절 기능을 갖춘 퍼지 제어기의 구조는 그림 7과 같다.

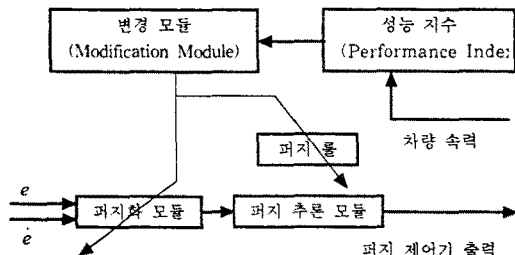


그림 7. 자기 조절 기능을 갖춘 퍼지 제어기

2.3.1 퍼지 제어 알고리즘

퍼지 제어기는 크게 퍼지화 모듈, 퍼지 추론 모듈, 퍼지 룰, 그리고 자기 학습 모듈로 구성되어 있다. 퍼지 집합의 소속도 함수는 그림 8과 같이 삼각형 구조를 가지며, ($a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6$)

에 의해 그 특성이 결정된다. 퍼지 룰은 다음과 같은 일반적인 구조를 취하고 있다.

Rule #(l,m) : IF e is NB and \dot{e} is PS

THEN (스로틀 밸브 출력 변화값) is W_{lm}^a .

(브레이크 출력 변화값) is W_{lm}^b

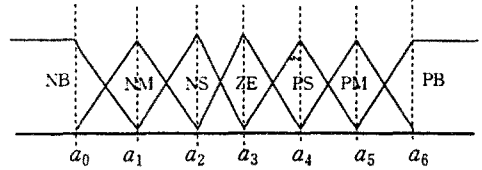


그림 8. 퍼지 집합의 소속도 함수

퍼지화 결과와 퍼지 룰을 이용하여 퍼지 추론을 거쳐 퍼지 제어기의 출력값을 결정한다. 출력값을 구하는 방식은 무게 중심법을 사용하였고, 그 결과는 (5)와 같다.

$$\Delta Y_a = \sum_{l=0}^6 \sum_{m=0}^6 (A_e^l(e) \cdot A_{de}^m(\frac{de}{dt})) \cdot W_{lm}^a$$

$$\Delta Y_b = \sum_{l=0}^6 \sum_{m=0}^6 (A_e^l(e) \cdot A_{de}^m(\frac{de}{dt})) \cdot W_{lm}^b$$

(5)에서 A_e^l 은 오차값(e)에 대한 퍼지 집합(NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB)의 소속도이고, A_{de}^m 은 오차 변화율(\dot{e})에 대한 소속도이다. 스톱 밸브와 브레이크간의 선택은 (6)에 의해 이루어진다.

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

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

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

2.3.2 자기 조절

자기 조절 방법은 Ryu Katayama가 제시한 내부 벌칙 함수를 이용한 오프-라인 자기 조절 방법을 실시간 제어에 이용할 수 있는 온-라인 알고리즘으로 개발하여 적용하였다. 기존의 최하강하법(Gradient method)만 사용하는 경우 자기 조절의 결과로 각 퍼지 집합간의 고유 질서가 어긋나는 경우가 있다. 이를 방지하기 위하여 비용 함수(cost function)에 오차값과 함께 소속도 함수간의 고유 질서를 수식화한 벌칙 함수(penalty function)를 첨가하게 된다. 이를 수식적으로 알아보면 (7)과 같이 k 번째 입력에 대한 소속도 함수들의 각 꼭지점의

순서를 나타내는 벡터 \vec{g}_k 를 정의한다. 그러면 소속도 함수간의 고유 질서는 $\vec{g}_k < \vec{0}$ 로 나타낼 수 있다.

$$\vec{g}_k = (a_k^0 - a_k^1, a_k^1 - a_k^2, \dots, a_k^5 - a_k^6) \quad (7)$$

이러한 제한 조건을 수식적으로 표현한 벌칙 함수 (penalty function)가 만족해야할 성질은 (8)과 같다.

$$\begin{aligned} \Phi(\vec{g}_k) &> 0 & \vec{g}_k &\in Z \\ \Phi(\vec{g}_k) &\rightarrow \infty & \vec{g}_k &\rightarrow \partial Z \end{aligned} \quad (8)$$

$$Z = \{ \vec{g}_k \mid \vec{g}_k < \vec{0} \}$$

∂Z : 집합 Z의 경계 (boundary of Z)

먼저 조건 $\vec{g}_k < \vec{0}$ 을 만족하는 벡터들로 구성된 집합을 Z라고 하자. 그러면 \vec{g}_k 가 집합 Z에 속할 때는 벌칙 함수는 양의 실수 값을 가지고 \vec{g}_k 가 집합 Z의 경계로 접근할수록 벌칙 함수의 값은 무한대에 접근하게 된다. 이러한 성질을 만족하기 위해서 본 논문에서 설정한 벌칙 함수와 이를 이용한 비용 함수를 (9)와 같이 정의하였다.

$$\begin{aligned} \Phi(\vec{g}_k) &= \sum_{i=0}^5 \frac{-1}{a_k^i - a_k^{i+1}} \\ E &= e_r + \frac{de_r}{dt} \\ P &= \frac{1}{2} E^2 + \gamma \cdot \Phi(\vec{g}_k) \end{aligned} \quad (9)$$

$\Phi(\vec{g}_k)$: 벌칙 함수
 P : 비용 함수
 γ : 벌칙 함수의 가중치 ($\gamma > 0$)
 e_r : 제어기 출력의 오차값

(9)에서 e_r 은 제어기의 출력값에 대한 오차값이나 실험 차량의 정확한 모델을 통한 비교값 (Desired Output of Controller)을 구할 수 없어 실제로 이용하기 어렵다. 따라서, 본 논문에서는 (10)과 같이 제어기의 출력값, 즉 차량의 입력과 차량의 출력값이 정상 상태에서 선형 관계를 유지한다고 가정하고 차량의 출력 오차(속력 오차나 가속도 오차)를 이용하여 이를 구하였다.

$$e_r = K_f \cdot e_{vehicle} \quad (10)$$

K_f : 차량의 입출력 비례 상수
 $e_{vehicle}$: 차량 출력의 오차

자기조절은 (9)의 비용 함수 P를 최하 강하법을 이용하여 (11)과 같이 나타낸다.

$$\begin{aligned} a_k^i(n+1) &= a_k^i(n) - \alpha \cdot \frac{\partial P(\vec{g}_k, n)}{\partial a_k^i(n)} \\ W_{im}^a(n+1) &= W_{im}^a(n) - \alpha \cdot \frac{\partial P(\vec{g}_k, n)}{\partial W_{im}^a(n)} \\ W_{im}^b(n+1) &= W_{im}^b(n) - \alpha \cdot \frac{\partial P(\vec{g}_k, n)}{\partial W_{im}^b(n)} \end{aligned} \quad (11)$$

여기서 a_k^i 는 k 번째 입력 변수에 대한 소속도 함수의 i 번째 꼭지점이고 W_{im}^a , W_{im}^b 는 스톱 밸브와 브레이크 페달에 대한 퍼지 룰을 각각 나타낸다. 그리고 α 는 자기조절 변수이다.

2.4 모의실험 및 도로주행시험 결과

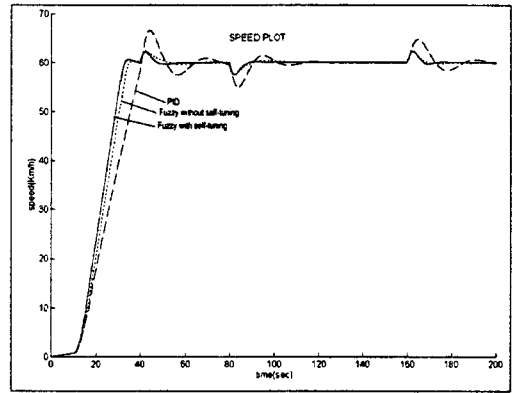


그림 9. 모의실험 결과

속력 제어기는 차량 모델을 이용한 모의실험을 통하여 기본적인 자기 조절을 실시하였다. 그림 9는 컴퓨터에서의 모의실험 결과를 나타내고 있다. 모의실험에서 원하는 속력은 60Km/h이며, 원하는 가속도는 3Km/h/sec이다. 모의실험 결과에서와 같이 PID 제어기와, 자기 조절이 없는 퍼지 제어기, 그리고 자기 조절 기능을 갖춘 퍼지 제어기 중에서 본 논문에서 제시한 자기 조절 퍼지 제어기가 가장 우수한 성능을 보임을 알 수 있다.

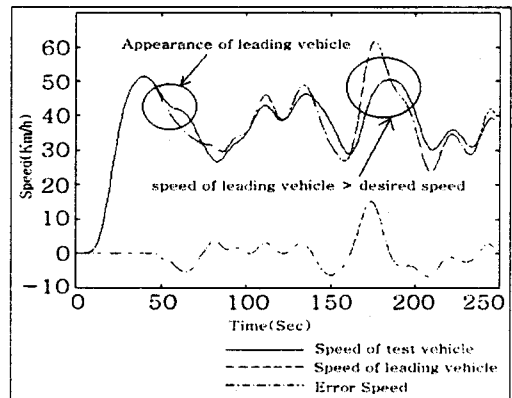


그림 10. 도로주행 시험

그림 10은 본 논문에서 제시한 지능 순항 제어기의 실차 적용 결과를 나타내고 있다. 실험 도로는 경사각과 곡률 변화가 다양한 일반 국도이다.

본 실험에서 원하는 차량의 속력은 50Km/h이다. 그림에서 볼 수 있듯이 전방에 차량이 출현하였을 때 차량의 속력을 전방 차량에 동기시키며, 전방 차량의 속력이 원하는 속도보다 클 때는 차량의 속력을 운전자의 원하는 속력으로 동기시키는 것을 알 수 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 내부 벌칙 함수를 이용한 자기 조절 기능을 갖춘 퍼지 지능 순항 제어기를 제안하였다. 제안된 제어기는 자기 조절 기능을 이용하여 차량 운행 환경의 여러 가지 변화에 대한 적응성을 높였다.

모의실험과 도로주행시험을 통하여 제안된 제어기가 응답 속도와 외란에 대한 강인성 및 적응성이 다른 제어기보다 뛰어난 것을 알 수 있다.

앞으로 경사로에서의 전방 감지 오류를 극복하기 위한 센서 데이터 처리에 대한 연구와 외부의 급격한 환경 변화에 대응하기 위한 차량 특성 연구와 이에 따른 보다 향상된 제어 기법의 연구가 필요하다.

[참 고 문 헌]

- [1] D. Cho and J. K. Hedrick, "Automotive Power Modeling for Control", Journal of Dyn. Sys. Meas. Control, Vol 111, pp568-576, 1989
- [2] P. Ioannou and Z. Xu, "Throttle and Brake Systems for Automatic Vehicle Following", I Journal, VOL 1(4), pp345-377, 1994
- [3] R. J. Caudill, P. Di Málteo and S. P. T "Longitudinal Control for Automated High Vehicles", Journal of Dyn. Sys. Meas. and C Vol 104, pp180-187, 1982
- [4.] P. Ioannou and C. C. Chien, "Autonomous Intelligent Cruise Control", Trans. on Vehicular Vol 42, No 24, pp657-672, 1993
- [5] 최재성, 장광수, "차량 간격 자동 제어 장치를 위한 퍼지 적응 제어 알고리즘 개발", 한국 자동차 공학회 춘계 학술 대회, pp306-312, 1995
- [6] St. Germann and R. Ishermann, "Non Distance and Cruise Control for Passenger Proc. of ACC, pp3081-3085, June, 1995
- [7] Rolf Müller and Gerhard Nöcker, "Intelligent Cruise Control with Fuzzy Logic", Fuzzy Logic Technology and Applications, pp74-80, 1994
- [8] T. P. Leung, Zhou Qi-Jie, Mao Zhong-Yua Yu De-Jiang, "A Design Method for Vehicle Dynamic

Systems Based on Fuzzy Logic Control", Pro ACC, pp3239-3243, June, 1995

[9] Ryu Katayama, Yuji Kajitami and Yu Nishida, "A Self Generating and Tuning Method of Fuzzy Modeling Using Interior Penalty Method", of the 2nd Int. Confer. on Fuzzy Logic and Neural Net.(IIZUKA '92, Iizuka, Japan), pp357-360, J 1995

[10] Thomas D. Gillespie, "Fundamentals of Vehicle Dynamics", SAE, 1992

[11] Mokhar S. Barzaraa and Hanif D. S "Nonlinear Programming", John Wiley & Sons 1992

[12] N. K. Rutland, "Illustration of a new principle design: Vehicle Speed Control", Int. J. Control, No 6, pp1319-1334, 1992

[13] Sujeet Shenoi, Kaveh Ashenayi and Timmerman, "Implementation of a Learning Controller", IEEE Control System, pp73-80, June