

Lateral Vehicle Guidance를 위한 퍼지 로직 제어기의 설계

김태형^{*}, 허경무^{**}

* KAIST 전기및전자공학과 ** 단국대학교 전자공학과

Fuzzy Logic Controller Design for Lateral Vehicle Guidance

Taihyung Kim^{*}, Kyungmoo Huh^{**}

^{*} KAIST ^{**} Dankook University

Abstract

For an automatic steering problem of vehicles, the main task is to keep a reference path with assumption that the displacement from the guideline can be measured by a sensor. In this paper, a sliding mode fuzzy logic controller design method is introduced and it shows highly enhanced performance in comparison with the other results. The method can be relatively simply implemented.

1. 서론

버스나 자동차등의 차량에 대한 automatic steering은 고속도로와 같은 전용도로내의 분리된 좁은 레인에서 사용될수 있으며, 현재의 복잡한 교통문제에 대한 미래의 하나의 해결책이 될 수도 있다는 점에서 주목할만하다. Automatic steering에 있어서 주요 문제는 guideline으로부터의 떨어진 거리를 센서로 측정할 수 있다는 가정하에, 주어진 길(reference path)을 따라 정확히 주행하는 것이다. 이때 차량의 주행 속도나 중량의 변동, 그리고 타이어나 도로면과의 접촉 마찰력의 변동등에 대한 견실성(robustness)이 매우 중요한 척도로 여겨지게 된다. 이에 대한 model data와 사양은 IFAC benchmark example[1]을 따르기로 한다. 본 논문에서는 이러한 견실성을 높이고 reference에 대한 오차가 최소화되는 운전이 가능한 제어를 슬라이딩 모드 퍼지 로직 제어(sliding mode fuzzy logic controller) 형태로서 설계하는 방법을 제시하고, 그 성능이 타 방법의 결과[1]와 비교해 훨씬 향상되었음을 보인다. 또한 실제 차량에서 구현한 퍼지 로직 제어의 예[3]에서는 입력력 멤버십 함수(membership function)나 scaling factor들을 결정(tuning)하는데 있어서 수많은 시행 착오가 필요하지만, 본 방법의 퍼지 추론 규칙에 의하면 훨씬 간단하고 빠르게 조정 및 구현을 할 수가 있고 성능도 향상됨을 보이고 있다. 본 제어기의 구현에서 yaw rate 피드백은 시스템의 안정(stability)을 위해서 필수적 기능을 하며, 만일 이 yaw rate 피드백이 사용가능하지 않다면 어떤 종류의 제어기 형태로도 차

량을 안정화시키기가 쉽지 않을것이다.

2. 동특성 모델과 문제 설정

2.1 차량 동특성 모델

그림 1에 vehicle steering에 대한 단순화된 단일 트랙 모델이 나타나 있다. 이때 차량 동특성(vehicle dynamics)은 식 (1)과 같은 5차 모델로 나타내어지게 된다. 그림 1에서 각 변수들은 각각 다음 랑을 뜻하고 있다.

- δ : steering angle, \vec{v} : CG에서의 속도 벡터,
- β : 차량 중심선과 \vec{v} 사이의 sideslip angle,
- r : yaw rate, $f_x(f_r)$: 앞(뒤) 타이어에 의한 lateral force,
- $l_f(l_r)$: 앞(뒤) 타이어와 CG 사이의 거리,
- l_s : 센서와 CG 사이의 거리, f_w : wind force,
- l_w : CG와 f_w 의 aerodynamic center 사이의 거리,
- $\Delta\phi$: 차량의 중심선과 guideline의 접선 사이의 각도

$$\begin{bmatrix} \dot{\beta} \\ \dot{r} \\ \dot{\Delta\phi} \\ \dot{y} \\ \dot{\delta}_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 & 0 & b_{11} \\ a_{21} & a_{22} & 0 & 0 & b_{21} \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ v & l_s & v & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta \\ r \\ \Delta\phi \\ y \\ \delta_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & d_{11} \\ 0 & 0 & d_{21} \\ 0 & -v & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_f \\ \rho_{rad} \\ f_w \end{bmatrix}$$

여기서 (1)

$$\begin{aligned} a_{11} &= -(c_r + c_f) / \tilde{m}v & b_{11} &= c_f / \tilde{m}v \\ a_{12} &= -1 + (c_r l_r - c_f l_f) / \tilde{m}v^2 & b_{21} &= c_f l_f \\ a_{21} &= (c_r l_r - c_f l_f) / J & d_{11} &= 1 / \tilde{m}v \\ a_{22} &= -(c_r l_r^2 + c_f l_f^2) / Jv & d_{21} &= l_w / J \end{aligned}$$

u_f : 제어 입력 ρ_{rad} : road curvature, $\frac{1}{R_{rad}}$ f_w : 돌풍 외란

2.2 설계 사양

2.2.1 차량의 외형 규격

차량의 외형 규격은 다음과 같다.

$$l_f=3.67m, \quad l_r=1.93m, \quad l_s=6.12m, \quad l_w=0.565m, \quad c_f=198,000 \text{ N/rad},$$

$$c_r=470,000 \text{ N/rad}, \quad v \in [1;20] \text{ m/sec}, \quad m=10000 \text{ Kg}, \quad \mu=1.0, \quad J=10000 \times 10.85 \text{ Kg} \cdot \text{m}^2.$$

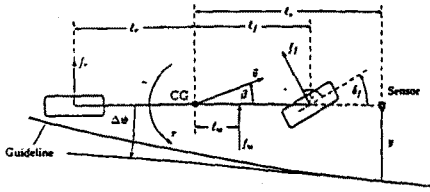


그림 1. vehicle steering의 단일 트랙 모델

2.2.2 설계 사양

IFAC benchmark[1]에 의한 설계 사양은 다음과 같다.

- steering angle limitation : $|\delta| \leq 40 \text{ deg}$
- steering angle rate limitation : $|\dot{\delta}| \leq 23 \text{ deg/sec}$
- 과도 상태에서 허용할수 있는 오차 거리 : 0.15 m
- steady state에서 허용할수 있는 오차 거리 : 0.02 m
- lateral motion의 고유 주파수 $\leq 1.2 \text{ Hz}$

2.2.3 성능 시험을 위한 주행 maneuver

제어 성능을 확인하기 다음과 같은 시험 시나리오를 작성하였다.

- 시험1: 10 m/sec의 일정속도, 초기 오차거리 2m, 직선 레인
- 시험2: 10 m/sec의 일정속도, 초기 오차거리 2m, 직선 레인
- 시간 5초일 때 1초간 550 N의 돌풍에 의한 외란 힘 발생
- 시험3: 속도가 초기속도 5 m/sec로부터 최종속도 20 m/sec까지 2 m/sec²의 가속도로 증가하고, 곡면인 주행 maneuver의 반경은 각각 $R_{mv} = 250 \text{ m}, -400 \text{ m}, 330 \text{ m}, -130 \text{ m}$ 로 한다.

(그림 2에 reference path에 대한 그림이 나타나 있다.)

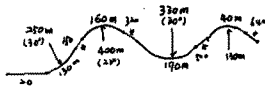


그림 2. driving maneuver reference path

3. 슬라이딩 모드 퍼지 로직 제어기의 설계

3.1 입력 변수와 멤버십 함수

차량으로부터 측정이 가능한 값들로서 퍼지 로직 제어기의 입력으로 사용할수 있는 신호들은 lateral displacement error(y)와 이 error의 변화율(Δy), 그리고 yaw rate(r)등이 있다. 이중 퍼지 로직 제어기의 적절한 입력은 오차 y와 오차의 변화율 Δy 이고, yaw rate r은 퍼지 로직 제어기의 출력과 결합하여 부궤환 루프(negative feedback stabilization loop)를 형성한다.(그림 5 참조) 오차 y와 오차의 변화율 Δy 의 정규화된(normalized) 입력 멤버십 함수는 그림 3과 같다. 여기서 정규화된 입력은 -2 부터 +2까지의 값들로서 5개의 term "NB, NS, ZR, PS, PB" 들로 나뉘어진다. 그림 4에 있는 정규화된 출력은 7개의 term 세트 멤버십 함수 "NB, NM, NZ, PZ, PM, PB" 로 이루어지고 그 값들은 -3 부터 +3 까지를 갖도록 하였다. 각 멤버십 함수들의 형태는 삼각구조(triangular)를 갖도록 하였다.

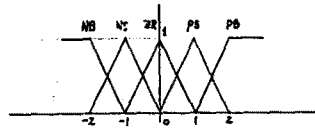


그림 3. 입력 멤버십 함수(input membership functions)

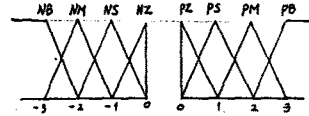


그림 4. 출력 멤버십 함수(output membership functions)

3.2 슬라이딩 모드 퍼지 규칙

슬라이딩 모드 퍼지 규칙은 규칙 테이블(rule table)의 슬라이딩 라인(sliding line)을 제외하고는 PD 형태의 제어기와 유사하다고 볼수 있다. 이 규칙의 설계시에는 다음과 같은 일반적인 가이드라인을 따르도록 한다.

- 제어 출력은 슬라이딩 라인의 왼쪽에서는 부(negative)의 값을 갖고, 오른쪽에서는 정(positive)의 값을 갖는다.
- 제어 출력의 절대값은 phase plane에서 state의 실제 위치와 슬라이딩 라인과의 거리가 멀수록 커져야 한다.
- 정규화된 phase plane에서 벗어난 정규화된 state e_N, \dot{e}_N 들은 해당 부호의 최대 제어 범위내에서 제어가 되도록 해야 한다.

입력과 출력 언어 변수(linguistic variables) term들의 갯수는 실제 적용시를 고려하여[3] 적절하게 결정되어야 한다.

위의 사항들을 고려하여 설계한 슬라이딩 모드 퍼지 테이블은 표 1과 같다. 여기에서 슬라이딩 라인 근처에 "NZ, PZ" term들이 위치하고 있으므로 자연스럽게 경계층이 형성되게 된다.

표 1. 슬라이딩 모드 퍼지 규칙 테이블

| | | | | | |
|---------------|----|----|----|----|----|
| \dot{y} \ y | NB | NS | ZR | PS | PB |
| PB | PS | NS | NM | NB | NB |
| PS | PM | PZ | NZ | NS | NM |
| ZR | PB | PS | PZ | NZ | NS |
| NS | PB | PM | PS | PZ | NZ |
| NB | PB | PB | PB | PM | PS |

3.3 제어기의 구조

제어기의 구조는 크게 두 부분으로 구분되는데 하나는 슬라이딩 모드 퍼지 제어 부분이고 다른 하나는 계인이 K,인 yaw rate 부 궤환 부분이다. 차량내의 자이로(gyro)에 의해 측정되는 yaw rate 피드백은 불확실한 동작 조건으로 인해 생기는 시스템 파라메타의 변동에 의한 영향을 크게 줄여줄수 있으며 따라서 automatic steering을 실현하는데 아주 적절한 역할을 하게 된다. 제어기의 구조는 그림 5와 같다.

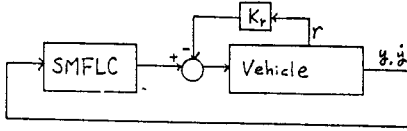


그림 5. 제어기의 블록 다이어그램

3.4 게인 조정

본 제어기에서는 조정해야 할 파라메타가 4개 있는데, 이들은 오차 y 와 오차의 변화율 Δy 에 대한 입력 scaling factor들, 그리고 출력 scaling factor 및 yaw rate 피드백 게인등이다.

경험에 의해 알수 있듯이 yaw rate 피드백은 시스템의 damping 특성에 직접적인 영향을 미치고, 나머지 파라메타들은 오차와 제어 출력이 큰 영향을 미친다. 따라서 먼저 yaw rate 피드백 게인을 조정하여 시스템이 안정화되도록 하면서 최상의 성능이 얻어질수 있도록 한다.(물론 이 조정값이 최적(optimum)이라 확신할 수 는 없다.) 그리고 오차에 미치는 영향을 생각할 때 출력 scaling factor의 변동이 입력 scaling factor의 변동보다 더 민감(sensitive)하다고 볼수 있기 때문에, 출력 scaling factor를 입력 scaling factor들보다 먼저 조정하도록 하였다. 그리고 오차와 오차의 변화율에 해당되는 두 개의 입력 scaling factor들은 시스템 게인(system gain)과 슬라이딩 라인의 기울기에 영향을 미치게 되는데, 오차의 scaling factor를 오차 변화율의 scaling factor보다 먼저 조정하도록 하였다.

이러한 조정을 MATLAB 그래픽 툴을 이용한 시뮬레이션을 통하여 시행착오를 거쳐 얻어내었다. 시뮬레이션을 통해 얻어낸 최종 게인값들은 다음과 같다. ; 입력 오차와 오차의 변화율에 대한 scaling factor는 둘다 4.0으로 같았고, 출력 scaling factor는 0.28이며 yaw rate 피드백 게인은 -4.7이었다.

4. 시뮬레이션 결과

4.1 일정 속도 직선 레인의 경우

시뮬레이션의 조건은 2.2.3절에 나타나 있는바와 같다. 이 조건은 시험 1에 해당되며 다음과 같다. : 일정속도 10 m/sec, 초기 오차 거리 2 m, 직선 레인 $\rho_{ref} = 0$.

그림 6에 시뮬레이션 결과가 나타나 있으며 이로부터 제어 시스템이 좋은 성능을 보이고 있음을 알수 있다.

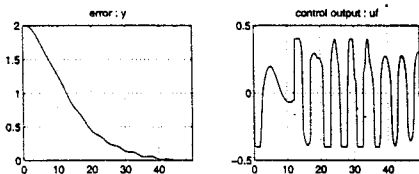


그림 6. 일정속도의 경우의 시뮬레이션 결과

4.2 돌풍 외란(Wind Disturbance)이 있는 경우

갑작스런 돌풍등이 차량에 가해지게 되면 전체 제어 시스템에 악영향을 미치게 된다. 이때의 조건은 4.1절과 같되 돌풍 외란이 추가되는것만이 다르다. 이때의 시뮬레이션 결과가 그림 7

에 나와 있는데, 여기서 보듯이 응답에 있어서 커다란 변화를 보이지 않았음을 알수 있다. 즉 슬라이딩 모드 퍼지 제어기가 외부 외란에 대한 견실성을 훨씬 향상시킬수 있다고 판단할수 있다.

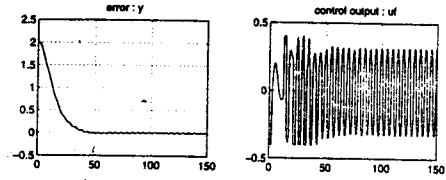


그림 7. 외란이 있는 경우의 시뮬레이션 결과

4.3 특정 곡면 주행 maneuver

여러 가지 다른 곡도(curvature)의 path들로 이루어진 길을 주행한다고 하였을때의 시뮬레이션 결과는 그림 8과 같으며, 이 결과로부터 작은 반경의 길에서 트랙 오차가 더 커졌음을 알수 있다. 이 결과는 큰 속도로 작은 반경의 길을 돌았을 때 원심력 때문에 더 큰 트랙 오차가 나는 것으로서 당연하다고 할수 있다.

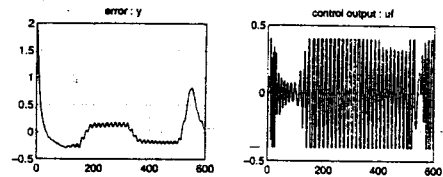


그림 8. 특정 곡면 주행시의 시뮬레이션 결과

5. 결론

본 논문에서는 슬라이딩 모드 퍼지 로직 제어기의 설계에 대해 다루었으며, 다른 방법에 의한 결과와 비교하여 향상된 성능을 보여주고 있다. 또한 그 구현 방법이 상대적으로 간단하다.

위 시뮬레이션 결과들에서 그 제어 출력을 보면 슬라이딩 라인 근처에서 부호의 변화가 일어나는 것을 볼 때, 슬라이딩 모드 퍼지 로직 제어기가 bang-bang 형태의 제어와 유사하다고 생각할수도 있다. 그리고 제어 출력과 거리 오차의 파형을 관찰하면 크기가 작은 oscillation들이 많이 나타나고 있지만, 이들이 시스템의 성능을 크게 떨어뜨릴 정도는 아님을 알수 있다. 만일 road curvature에 대한 사전 정보가 충분하다면 feedforward path를 제어기에 추가함으로써 오차 거리를 더욱 줄일수 있을 것이다.

6. 참고문헌

- [1] J. Ackermann, J. Guldner, W. Siemel, R. Steinhauser, and Vadim I. Utkin, "Linear and nonlinear controller design for robust automatic steering", *IEEE Trans. on Control System Technology*, Vol.3, No.1, pp. 132-143 Mar. 1995
- [2] J. Guldner, Vadim I. Utkin, J. Ackermann, "A sliding mode control approach to automatic car steering", *Proc. of American Control Conference*, June 1994, pp. 1969-1973
- [3] Thomas Hessenburg and Masayoshi Tomizuka, "Fuzzy logic control for lateral vehicle guidance", *IEEE* Aug. 1994, pp. 55-63