# LAB MEETING

국민대학교 지능형 차량 신호 처리  연구실 학부연구생 김지원

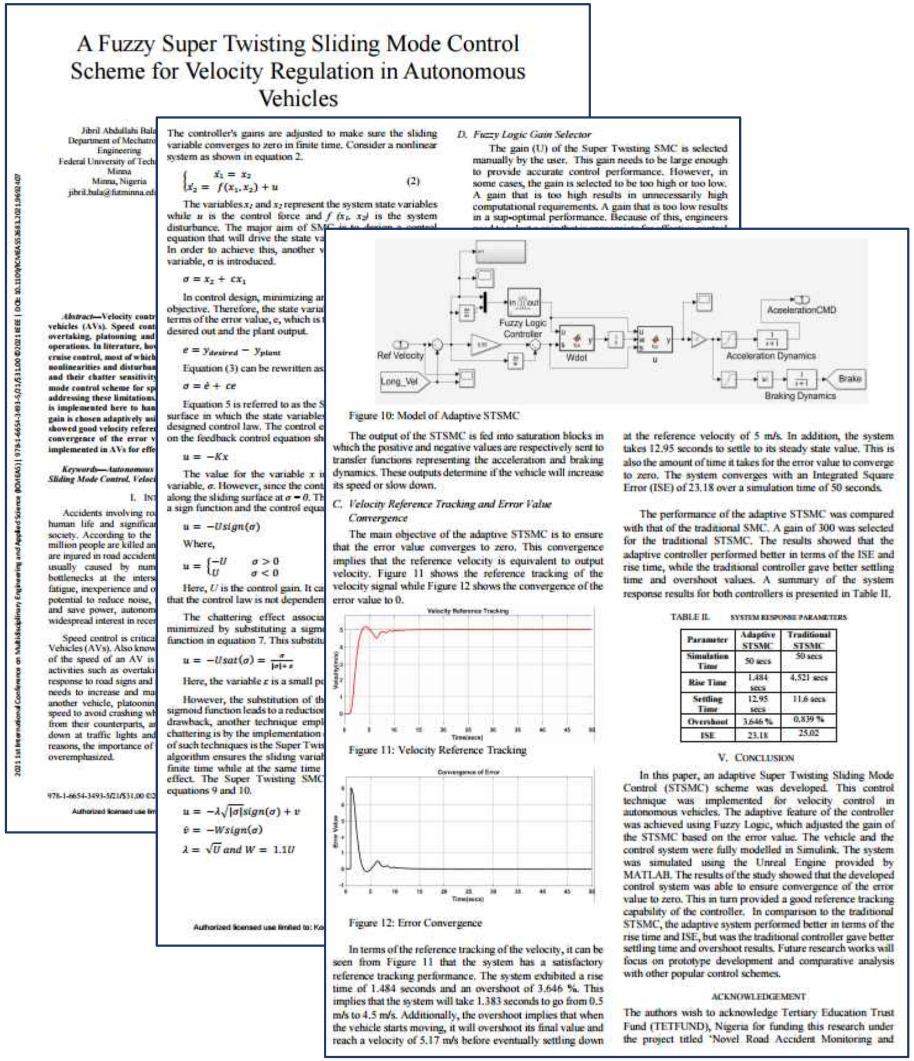
2024.02.03(월)

# Traditional SMC 제어기 구현을 통한 STSMC 비교군 생성

# Fuzzy Super Twisting Sliding Mode Control(Fuzzy STSMC) 구현

## Fuzzy Super Twisting Sliding Mode Control(Fuzzy STSMC)

### Fuzzy STSMC 참고 논문




### 논문 아키텍쳐

1. 엑추에이터 손상, 제어 효율 저하, 불안정성 증가 등을 초래하는 고전 SMC 채터링 단점 언급.
2. Fuzzy Logic Algorithm을 통해 적응형 제어 이득 기법 제안.
3. 위 단점을 보완하는 Fuzzy Super Twisting Sliding Mode Control 기법 제안.

### 논문 주요 키워드

- Super Twisting Sliding Mode Control(STSMC)
- Fuzzy Logic Algorithm
- Mamdani FIS
- Fuzzification
- Fuzzy Rule-Based
- Fuzzy Inference
- Defuzzification
- Triangular Membership Functions(MFs)

## Fuzzy Super Twisting Sliding Mode Control(Fuzzy STSMC) 구현

**Fuzzy Super Twisting Sliding Mode Control(Fuzzy STSMC)**

### Super Twisting Sliding Mode Control(STSMC)

1. 고차 슬라이딩 모드 제어(HOSMC)의 한 형태
2. 전통적인 SMC에서 발생되는 채터링을 해결하기 위한 제어 기법

### System Model

$$\dot{x}_1 = x_2$$

$$\dot{x}_2 = f(x_1, x_2) + bu$$

X1, x2: 시스템 상태 변수

f(x1,x2): 비선형 시스템 함수

b: 시스템 이득

u: 제어 입력

### Sliding Surface

$$\sigma = C_1 e + C_2 \dot{e}$$

Sigma: 슬라이딩 변수(슬라이딩 표면)

e: 오차 (Reference velocity와 Ego velocity의 차이)

C1, C2: 슬라이딩 계수

### Super Twisting Sliding Mode Control Algorithm

$$\lambda = \sqrt{U}$$

$$W = 1.1\boxed{U}$$ U : STSMC 제어 이득, Fuzzy Logic 적용 파라미터

$$\dot{v} = -W sign(\sigma)$$

$$\boxed{u = -\lambda\sqrt{|\sigma|} sign(\sigma) + v}$$ : STSMC의 최종 출력

iVSP

# Fuzzy Super Twisting Sliding Mode Control(Fuzzy STSMC)

## Fuzzy Logic Algorithm

1. 불확실하고 모호한 정보 처리를 위한 수학적 기법
2. '참'과 '거짓 ' 사이의 연속적인 상태를 가질 수 있게 하여 복잡한 문제를 모델링 가능.
3. Fuzzy sets, Fuzzification, Rule-based System, Defuzzification, centroid method 등 주요 개념 존재.

## Fuzzy Logic Gain Selector(Mamdani FIS)

1. 참고 논문에선 MATLAB Logic Toolbox를 통해 Fuzzy Logic Gain Selector 구현.
2. Fuzzy Logic Algorithm이자, 추론화 시스템인 Mamdani FIS 활용.

퍼지화 (Fuzzification) → 퍼지 규칙 기반 (Fuzzy Rule-Based) → 퍼지 추론 (Fuzzy Inference) → 디퍼지화 (Defuzzification)

- **Fuzzification**
삼각형 멤버십 함수(MFs)를 통해 입력값을 퍼지 집합으로 변환.

- **Fuzzy Rule-Based**
오차와 제어 동작(제어 이득)이 비례한다는 판단에 기초하여 규칙 정의.

- **Fuzzy Inference**
퍼지 규칙 기반으로 입력값에 대한 출력값 도출(추론), 보편적으로 사용되는 MIN-MOD-MAX 방법 사용.

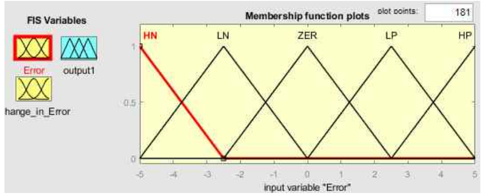
- **Defuzzification**
퍼지화된 출력값을 제어기에서 사용 가능한 명확한 값으로 변환, 보편적으로 사용되는 중심법(Centroid method) 사용.

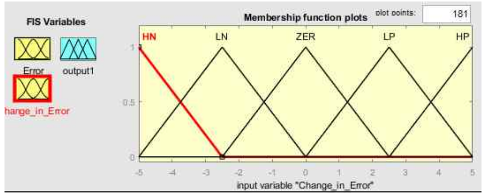
# Fuzzy Super Twisting Sliding Mode Control(Fuzzy STSMC) 구현

## Fuzzy Super Twisting Sliding Mode Control(Fuzzy STSMC)

## Fuzzy Logic Gain Selector 구현

### Fuzzification



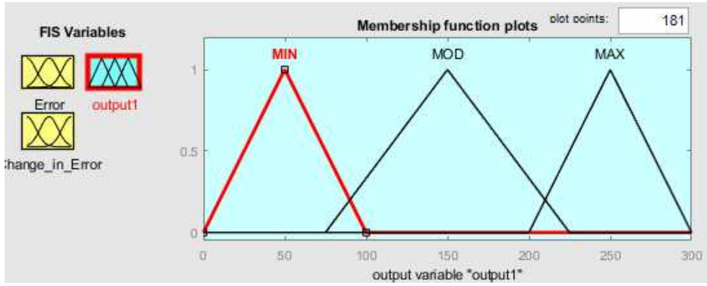




입력 변수(오차, 오차 변화율) 범위는 -5 ~ 5로 정의.

입력 변수 각각 5개의 멤버십 함수(MFs)를 포함.

높은 음수(High Negative, HN), 낮은 음수(LN), 제로(ZER), 낮은 양수(LP), 높은 양수(HP)

### Fuzzy Inference




출력 변수(제어 이득(U)) 범위는 0~300으로 정의.

출력 변수는 3개의 멤버십 함수(MFs)를 포함.

최소 동작( Minimal Action, MIN), 중간 동작(MOD), 최대 동작(MAX)

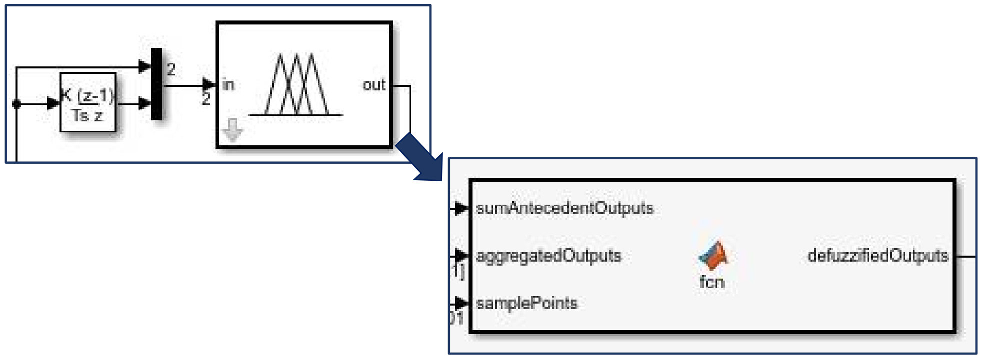
### Fuzzy Rule-Based

TABLE I. FUZZY RULES FOR GAIN SELECTION

| Error/Change in Error | HN | LN | ZER | LP | HP |
|---|---|---|---|---|---|
| HN | MAX | MAX | MAX | MAX | MAX |
| LN | MAX | MOD | MOD | MOD | MAX |
| ZER | MOD | MIN | MIN | MIN | MOD |
| LP | MAX | MOD | MOD | MOD | MAX |
| HP | MAX | MAX | MAX | MAX | MAX |

1. If (Error is HN) and (Change_in_Error is HN) then (output1 is MAX) (1)
2. If (Error is HN) and (Change_in_Error is LN) then (output1 is MAX) (1)
3. If (Error is HN) and (Change_in_Error is ZER) then (output1 is MAX) (1)
4. If (Error is HN) and (Change_in_Error is LP) then (output1 is MAX) (1)
5. If (Error is HN) and (Change_in_Error is HP) then (output1 is MAX) (1)
6. If (Error is LN) and (Change_in_Error is HN) then (output1 is MAX) (1)
7. If (Error is LN) and (Change_in_Error is LN) then (output1 is MOD) (1)
8. If (Error is LN) and (Change_in_Error is ZER) then (output1 is MOD) (1)
9. If (Error is LN) and (Change_in_Error is LP) then (output1 is MOD) (1)
10. If (Error is LN) and (Change_in_Error is HP) then (output1 is MAX) (1)
11. If (Error is ZER) and (Change_in_Error is HN) then (output1 is MOD) (1)
12. If (Error is ZER) and (Change_in_Error is LN) then (output1 is MIN) (1)
13. If (Error is ZER) and (Change_in_Error is ZER) then (output1 is MIN) (1)
14. If (Error is ZER) and (Change_in_Error is LP) then (output1 is MIN) (1)
15. If (Error is ZER) and (Change_in_Error is HP) then (output1 is MOD) (1)
16. If (Error is LP) and (Change_in_Error is HN) then (output1 is MAX) (1)
17. If (Error is LP) and (Change_in_Error is LN) then (output1 is MOD) (1)
18. If (Error is LP) and (Change_in_Error is ZER) then (output1 is MOD) (1)
19. If (Error is LP) and (Change_in_Error is LP) then (output1 is MOD) (1)
20. If (Error is LP) and (Change_in_Error is HP) then (output1 is MAX) (1)
21. If (Error is HP) and (Change_in_Error is HN) then (output1 is MAX) (1)
22. If (Error is HP) and (Change_in_Error is LN) then (output1 is MAX) (1)
23. If (Error is HP) and (Change_in_Error is ZER) then (output1 is MAX) (1)
24. If (Error is HP) and (Change_in_Error is LP) then (output1 is MAX) (1)
25. If (Error is HP) and (Change_in_Error is HP) then (output1 is MAX) (1)

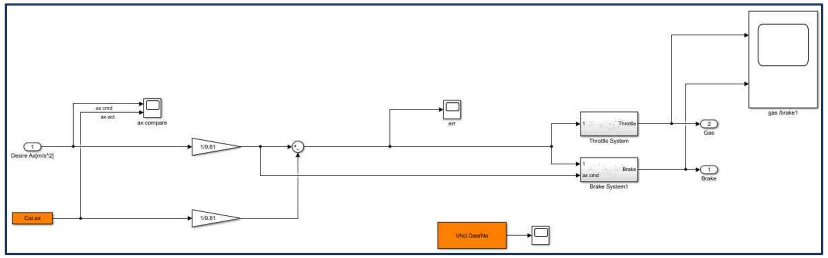
### Defuzzification

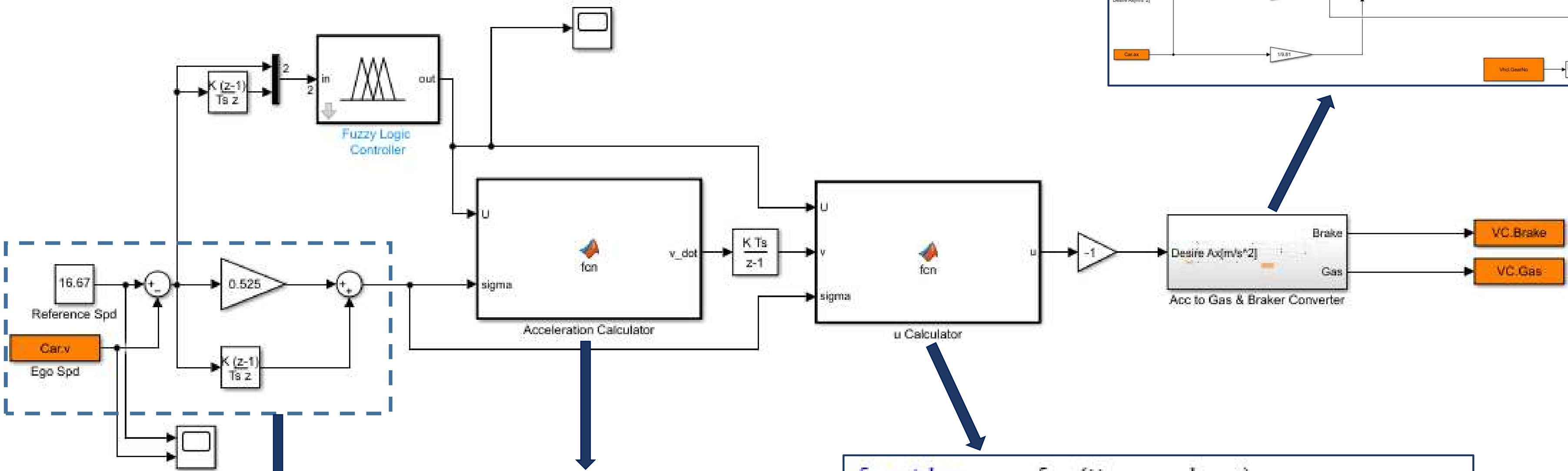


## Fuzzy Super Twisting Sliding Mode Control(Fuzzy STSMC) 구현

### Fuzzy Super Twisting Sliding Mode Control(Fuzzy STSMC)

### Fuzzy STSMC Simulink 구조도






```
function v_dot = fcn(U, sigma)

% 다음은 STSMC 알고리즘 관련 식
W = 1.1*U;
v_dot = -W*sign(sigma);
```

```
function u = fcn(U, v, sigma)

gamma = sqrt(U);
u = -gamma*sqrt(abs(sigma))*sign(sigma) + v;
```

$\sigma = 0.525e + \dot{e}$ : Sliding Surface 정의

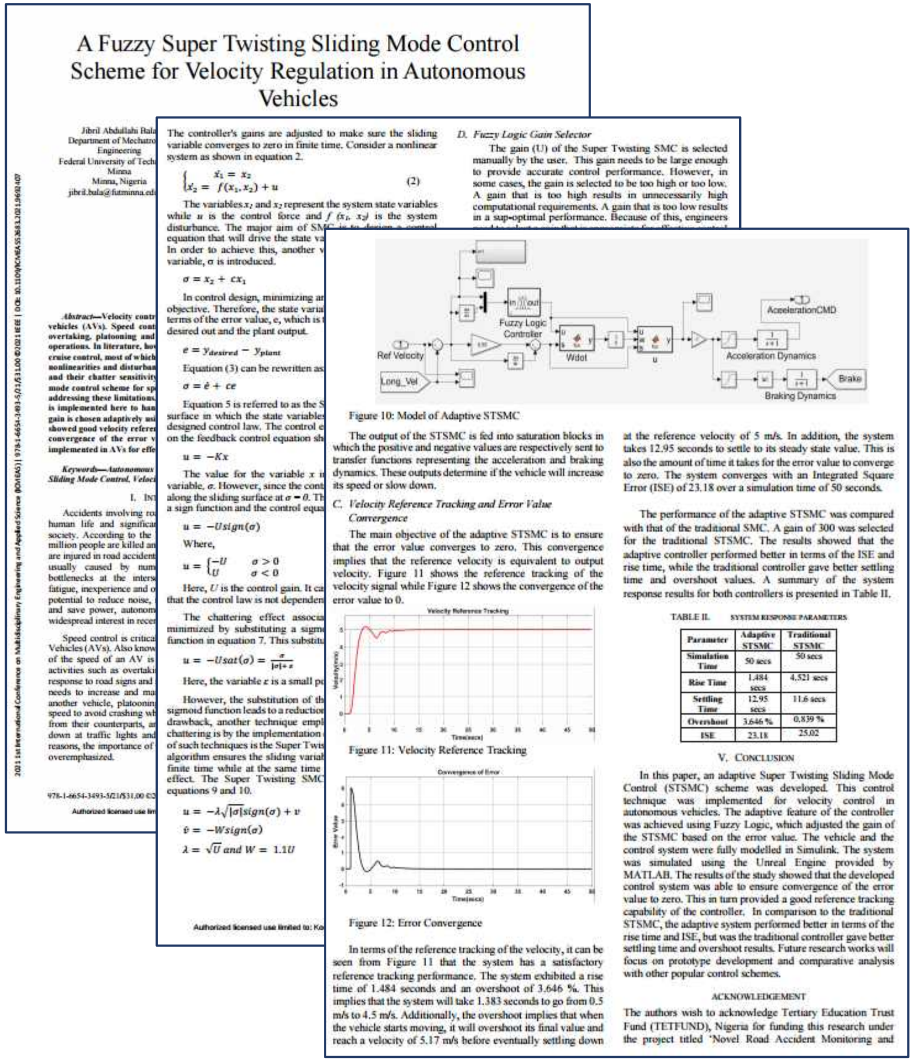
TABLE II. SYSTEM RESPONSE PARAMETERS

| Parameter | Adaptive STSMC | Traditional STSMC |
|---|---|---|
| Simulation Time | 50 secs | 50 secs |
| Rise Time | 1.484 secs | 4.521 secs |
| Settling Time | 12.95 secs | 11.6 secs |
| Overshoot | 3.646 % | 0.839 % |
| ISE | 23.18 | 25.02 |

# Fuzzy Super Twisting Sliding Mode Control(Fuzzy STSMC) 구현

## Fuzzy Super Twisting Sliding Mode Control(Fuzzy STSMC)

## Traditional SMC 참고 논문



A Fuzzy Super Twisting Sliding Mode Control Scheme for Velocity Regulation in Autonomous Vehicles

Figure 10: Model of Adaptive STSMC

The output of the STSMC is fed into saturation blocks in which the positive and negative values are respectively sent to transfer functions representing the acceleration and braking dynamics. These outputs determine if the vehicle will increase its speed or slow down.

*C. Velocity Reference Tracking and Error Value Convergence*

The main objective of the adaptive STSMC is to ensure that the error value converges to zero. This convergence implies that the reference velocity is equivalent to output velocity. Figure 11 shows the reference tracking of the velocity signal while Figure 12 shows the convergence of the error value to 0.

Figure 11: Velocity Reference Tracking

Figure 12: Error Convergence

In terms of the reference tracking of the velocity, it can be seen from Figure 11 that the system has a satisfactory reference tracking performance. The system exhibited a rise time of 1.484 seconds and an overshoot of 3.646 %. This implies that the system will take 1.383 seconds to go from 0.5 m/s to 4.5 m/s. Additionally, the overshoot implies that when the vehicle starts moving, it will overshoot its final value and reach a velocity of 5.17 m/s before eventually settling down at the reference velocity of 5 m/s. In addition, the system takes 12.95 seconds to settle to its steady state value. This is also the amount of time it takes for the error value to converge to zero. The system converges with an Integrated Square Error (ISE) of 23.18 over a simulation time of 50 seconds.

The performance of the adaptive STSMC was compared with that of the traditional SMC. A gain of 300 was selected for the traditional STSMC. The results showed that the adaptive controller performed better in terms of the ISE and rise time, while the traditional controller gave better settling time and overshoot values. A summary of the system response results for both controllers is presented in Table II.

TABLE II. SYSTEM RESPONSE PARAMETERS

| Parameter | Adaptive STSMC | Traditional STSMC |
|---|---|---|
| Simulation Time | 50 secs | 50 secs |
| Rise Time | 1.484 secs | 4.521 secs |
| Settling Time | 12.95 secs | 11.6 secs |
| Overshoot | 3.646 % | 0.839 % |
| ISE | 23.18 | 25.02 |

V. CONCLUSION

In this paper, an adaptive Super Twisting Sliding Mode Control (STSMC) scheme was developed. This control technique was implemented for velocity control in autonomous vehicles. The adaptive feature of the controller was achieved using Fuzzy Logic, which adjusted the gain of the STSMC based on the error value. The vehicle and the control system were fully modelled in Simulink. The system was simulated using the Unreal Engine provided by MATLAB. The results of the study showed that the developed control system was able to ensure convergence of the error value to zero. This in turn provided a good reference tracking capability of the controller. In comparison to the traditional STSMC, the adaptive system performed better in terms of the rise time and ISE, but was the traditional controller gave better settling time and overshoot results. Future research works will focus on prototype development and comparative analysis with other popular control schemes.

ACKNOWLEDGEMENT

The authors wish to acknowledge Tertiary Education Trust Fund (TETFUND), Nigeria for funding this research under the project titled 'Novel Road Accident Monitoring and

### 논문 아키텍쳐

1. 강인한 횡방향 제어에서 체터링을 최소화하는 전통 SMC 알고리즘 제시.
2. 안전성 및 차선 이탈 최소화 보장을 위해, 차선 추적 동역학에 횡방향 및 요 오프셋을 포함.

### 논문 주요 키워드

- Traditional Sliding Mode Control
- Lane Tracking Dynamics
- Lateral Vehicle Dynamics
- Sliding Surface
- Lateral Position Offset
- Yaw Angle Offset
- Lookahead Distance

# Fuzzy Super Twisting Sliding Mode Control(Fuzzy STSMC) 구현

## Fuzzy Super Twisting Sliding Mode Control(Fuzzy STSMC)

## Traditional Sliding Mode Control

1. 고차 슬라이딩 모드 제어(HOSMC), STSMC 등의 근간이 되는 제어 기법
2. Side Slip Angle, Road Curvature, Lookahead Distance를 offset에 적용

### Parameters

m: 차량의 질량 (Kg)
v: 차량의 종방향 속도 (100 Km/h)
$\beta$: 측면 미끄럼 각도 (Degrees)
Jz: 차량의 요모멘트 관성 (Yaw moment of inertia)
Fyf: 전륜의 횡방향 힘 (Newton)
Fyr: 후륜의 횡방향 힘 (Newton)
ψ_dot: 차량의 요속도 (Yaw rate) (Degrees/sec)
lf: 차량의 앞바퀴에서 중심까지의 거리
lr: 차량의 뒷바퀴에서 중심까지의 거리
Fwind: 횡풍에 의한 차량의 횡방향 힘 (Newton)
Fψ: 요모멘트에 의한 차량의 횡방향 힘 (Newton)
yl: 횡방향 오차
Ls: 룩 어헤드 거리
psil: 방향 오차
pr: 도로 곡률
Cf: 전륜 코너링 강성 계수
Cr: 후륜 코너링 강성 계수
alphaf: 전륜 슬립 각도
alphar: 후륜 슬립 각도
mue: 도로 마찰 계수
deltaf: (전륜) 스티어링 각도

### Sliding Surface

```
s = yl + lamda*psil;
s_dot = yl_dot + lamda*psil_dot;
=> s_dot = e_2dot + lamda*e_dot; % (= 0)
=> s_dot = yl_2dot + Ls*psil_2dot + lamda*(yl_dot + Ls*psil_dot);
```

s: 슬라이딩 표면
s_dot: 슬라이딩 표면 변화율
Lamda: 수렴율

### Lateral Offset & Yaw Angle Offset

```
yl_dot = beta*vx + Ls*psi + psil*vx;
psil_dot = psi + pr*vx;
```

Lateral Offset에는 beta, Ls를 추가, Yaw Angle Offset에는 pr를 추가
-> 차선 추적 안전성 및 제어 강건성 확보

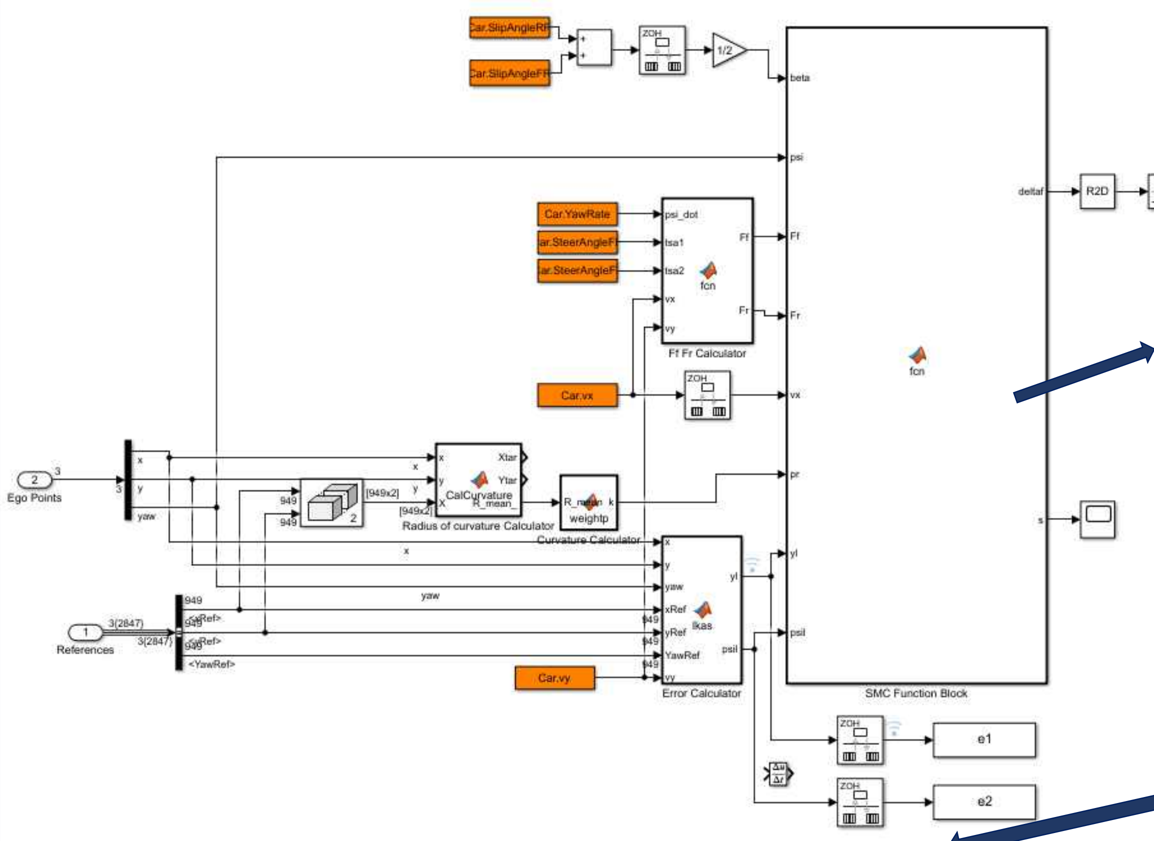
### Output(Desired SWA)

```
deltafe = 1/(mue*Cf/m + 2*Ls*Lf*mue*Cf/lz)*(mue*Cr*(beta - Lr*psi/vx)/m + mue*Cr*(beta + Lf*psi/vx)/m +
2*Ls*Lf*Cf*mue*(beta + Lf*psi/vx)/lz - 2*Ls*Lr*Cr*mue*(beta - Lr*psi/vx)/lz +
pr*vx^2 - lamda*beta*vx - lamda*Ls*pi - lamda*psil*vx - lamda*Ls*psi + lamda*Ls*pr*vx);

deltafd = n*sign(s); % 불연속적인 조향각

deltaf = deltae + deltafd;
```

## Fuzzy Super Twisting Sliding Mode Control(Fuzzy STSMC) 구현

# Fuzzy Super Twisting Sliding Mode Control(Fuzzy STSMC)

### Fuzzy STSMC Simulink 구조도




```
function [deltaf, s] = fcn(beta, psi, Ff, Fr, vx, pr, yl, psil)
m = 2044.2; % 차량 질량
Iz = 3558.1;% 요 관성 모멘
lf =  1.314; % 앞축 거리
lr =  1.786; % 뒷축 거리
Cf = 110000; % 앞바퀴 코너링 강성
Cr = 98000; % 뒷바퀴 코너링 강성
mue = 0.9;
Ls = 1;
lamda = 1; % 수렴율
pi = 1;
n = 0.9; % 0보다 큰 사용자 정의 상수

yl_dot = beta*vx + Ls*psi + psil*vx;
psil_dot = psi + pr*vx;

e = yl + Ls*psil;
e_dot = yl_dot + Ls*psil_dot;

% 오차면 정의
s = e_dot + lamda*e;
% s_dot = yl_2dot + Ls*psil_2dot + lamda*(yl_dot + Ls*psil_dot);

deltae = 1/(mue*Cf/m + 2*Ls*lf*mue*Cf/Iz)*(mue*Cr*(beta - lr*psi/vx)/m + mu
deltafd = n*sign(s); % 불연속적인 조향각

deltaf = deltae + deltafd;
```

deltafe(연속적인 제어)
- 시스템 등가 입력 제어(System Equivalent Control Input)
- 시스템이 슬라이딩 면 위에 있을 때 유지되도록 하는 연속 제어
- 차량 모델 기반으로 조향각 결정
- Traditional SMC에서 피드백 제어 역할

deltafd(불연속적인 제어)
- 일반적으로 스위칭 제어 기반으로 구성
- 시스템을 슬라이딩 면 위에 강제 접근하도록 제어
- 계수(n)을 통해 불연속 제어 강도 조절 가능
- 단순 스위칭 제어 적용 시, 채터링 발생

**Fuzzy Super Twisting Sliding Mode Control(Fuzzy STSMC)**

## 2월 개인연구 계획

### 강화학습

1. 패스트캠퍼스 강의 복습 및 추가 강의 시청.
2. 김지훈 졸업생의 DDPG(Deep Deterministic Policy Gradient), TD(Temporal Difference) 알고리즘 코드 분석 및 시뮬레이션.
3. 강화학습 타켓 논문 선정 및 구현.

### SMC

1. Traditional SMC 구현 및 시뮬레이션.
2. Carmaker 시나리오 고도화.
3. STSMC와 Traditional SMC 비교 분석.

# 감사합니다.

국민대학교 지능형 차량 신호 처리  연구실 학부연구생 김지원

2024.02.03(월)