

# LAB MEETING

국민대학교 지능형 차량 신호 처리 연구실 학부연구생 김지원

2024.08.30(금)



국민대학교  
KOOKMIN UNIVERSITY

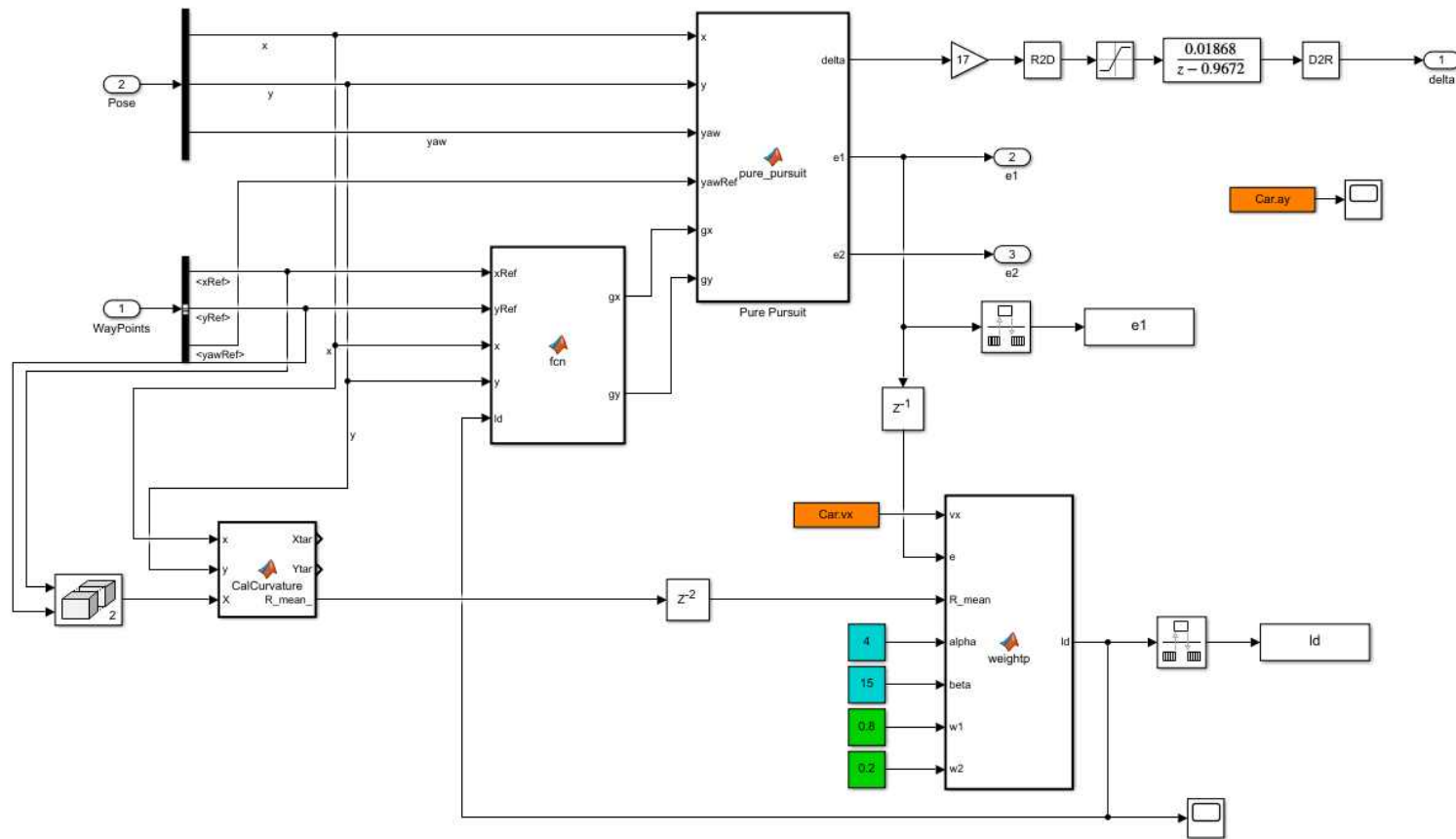
# Pure Pursuit, Stanley, LQR 횡방향 제어 성능 비교 및 설명



국민대학교  
KOOKMIN UNIVERSITY

## Pure Pursuit 구조도 및 설명

## Pure Pursuit 구조도



## Pure Pursuit 구조도 및 설명

## ■ gx, gy Calculator Function Block

```
function [gx,gy]=fcn(xRef,yRef,x,y,ld)
    gx=0;
    gy=0;

    [~,idx]=min((xRef-x).^2+(yRef-y).^2);
    if idx<1
        idx=2;
    end

    cnt=0;
    k=1;
    for i=idx:length(xRef)-1
        cnt=cnt+sqrt((xRef(i+1)-xRef(i))^2+(yRef(i+1)-yRef(i))^2);
        if cnt>ld
            k=i;
            break;
        end
    end
    gx=xRef(k);
    gy=yRef(k);
end
```

Cnt는 reference 좌표마다 차이를 누적한 값으로, 이전 ld값과 비교.  
Cnt가 이전 ld값보다 커지면 그 직전 reference좌표를 ld좌표로 선정.



## Pure Pursuit 구조도 및 설명

## Weight Calculator Function Block

```
function ld=weightp(vx, e, R_mean, alpha, beta, w1, w2)
% persistent e_ firstRun
% if isempty(firstRun)
%     e_=0;
%     firstRun=1;
% else
%     e_=e;
% end
```

```
vx=vx*3.6;
```

```
k=1/R_mean; %곡률 계산부로 받아온 곡률반경으로부터 곡률 정의.
```

```
yc=abs(log(abs(k)+abs(e)))+alpha; %논문을 참고한 곡률 관련 계산부.
yv=beta*sin(0.5*vx*pi/180); %논문을 참고한 속도 관련 계산부.
```

```
ld=w1*yc+w2*yv; %계산부x가중치를 통한 ld정의.
```

곡률 관련 계산부  $\alpha = 4$ 로 설정.  
 곡률 관련 계산부 최종값( $yc$ )의 가중치  $w1 = 0.8$ 로 설정.  
 속도 관련 계산부  $\beta = 15$ 로 설정.  
 속도 관련 계산부 최종값( $yv$ )의 가중치  $w2 = 0.2$ 로 설정

## 가중치를 적용한 Variable Look Ahead Distance 모델 개발 및 성능비교

박 경 욱<sup>1,2)</sup>, 박 종 휘<sup>2)</sup>, 허 명 선<sup>1)</sup>, 한 지 형<sup>1)</sup>, 유 병 용<sup>2)</sup>모토노머스에이투지 연구개발부<sup>1)</sup>, 경일대학교 기계자동차학부<sup>2)</sup>

## Development of a Weighted Variable Look Ahead Distance Model and Performance Comparison

Kyeoungwook Park<sup>1,2)</sup>, Jonghui Park<sup>2)</sup>, Myungseon Heo<sup>1)</sup>, Jihyeong Han<sup>1)</sup>, Byungyong You<sup>2)</sup><sup>1)</sup>Autonomous Vehicle R&D Group, Autonomous a22, 79 Gamamil-gil, Hyeongsang, Gyeongsang-si, Gyeongbuk 38429, Korea<sup>2)</sup>Department of Mechanical, Automotive Engineering, Kyungil University, Gyeongsangbuk 38428, Korea  
(Received 12 June 2019 / Revised 5 September 2019 / Accepted 9 September 2019)

**Abstract** : In most cases, drivers operate the steering and speed control based on curvature, lane, or relative vehicle information. Self-driving cars normally use error distance and error angle to lateral control in order to follow the reference path, and the error parameters are calculated based on the look ahead distance(LAD). For an efficient lateral control, the LAD must vary according to the road and the driving environment. In this paper, a LAD model was proposed by using lateral error, road curvature, and vehicle speed. In order to check the performance of the proposed model, we compared our own with the static and conventional LAD model. Computer simulations and experiments were performed in order to verify the advantages of the proposed LAD model.

**Key words** : LAD(Look ahead distance, 전방주시거리), Curvature(곡률), Weight(가중치), Variable LAD(가변하는 전방주시거리), Static LAD(고정된 전방주시거리), Lateral vehicle(차차와의 횡방향오차), Lateral error(전방주시거리와의 횡방향오차)

## 1. 서론

최근 자율주행 기술 및 관련된 운전자 보조시스템(ADAS)에 관한 연구가 진행<sup>1-6)</sup>되면서 운전자들의 횡방향 조향 제어에 관한 연구 범위가 점차 확대되고 있다.<sup>6-9)</sup> 일반적으로 자동차를 운전하는 운전자들은 곡률이나 차선 또는 상대 차량 정보를 기반으로 조향 제어를 수행한다. 자율주행 자동차 또한 스스로 주행하기 위해 차선이나 곡률 등의 정보가 필요하며,<sup>10)</sup> 효율적인 횡방향 제어 위해 미리 주시거리인 LAD(Look Ahead Distance)<sup>11)</sup>가

다. 따라서 자율주행 자동차의 LAD는 도로 환경에 따라 가변하는 값이어야 한다. 또한 운전자들은 대부분 전방 상황에 따라 고속, 저속 주행하므로 속도에 따라 전방 주시거리가 달라진다. 예를 들어 차량 앞에 장애물이 없거나 차량이 적은 도로에서는 멀리주시하며 고속 주행하고, 전방에 장애물이 있거나 차량이 많은 도로에서는 가깝게 주시하며 저속 주행하게 된다. 즉, 도로환경의 변화에만 LAD가 가변되는 것이 아니라 전방에 장애물이나 선행차량의 존재에 따른 속도변화에도 LAD가 가변되어야 한다. Wang 등의 Variable LAD<sup>12)</sup>모델은 차량과 레퍼런스 경로사이의 수직거리와 차차속도를 반영하여 구성하였으며 실시간으로 Static LAD모델과 비교하여 Variable LAD모델 기반의 제어성능이 우수함을 보였다. 그러나 Variable LAD모델에서는 도로의 곡률대신 차량과 경로사이의 수직거리와 속도를 제어 파라미터로 사용했기에 도로환경이 급격히 변할 때 LAD가 빠르게 반응

## 2.2 Proposed LAD의 수학적 모델

본 논문에서 제안한 Proposed LAD는 횡방향 오차(Lateral error)와 곡률데이터에 의한 수학적 모델과 속도데이터에 대한 수학적 모델을 이용하여 LAD를 출력한다.

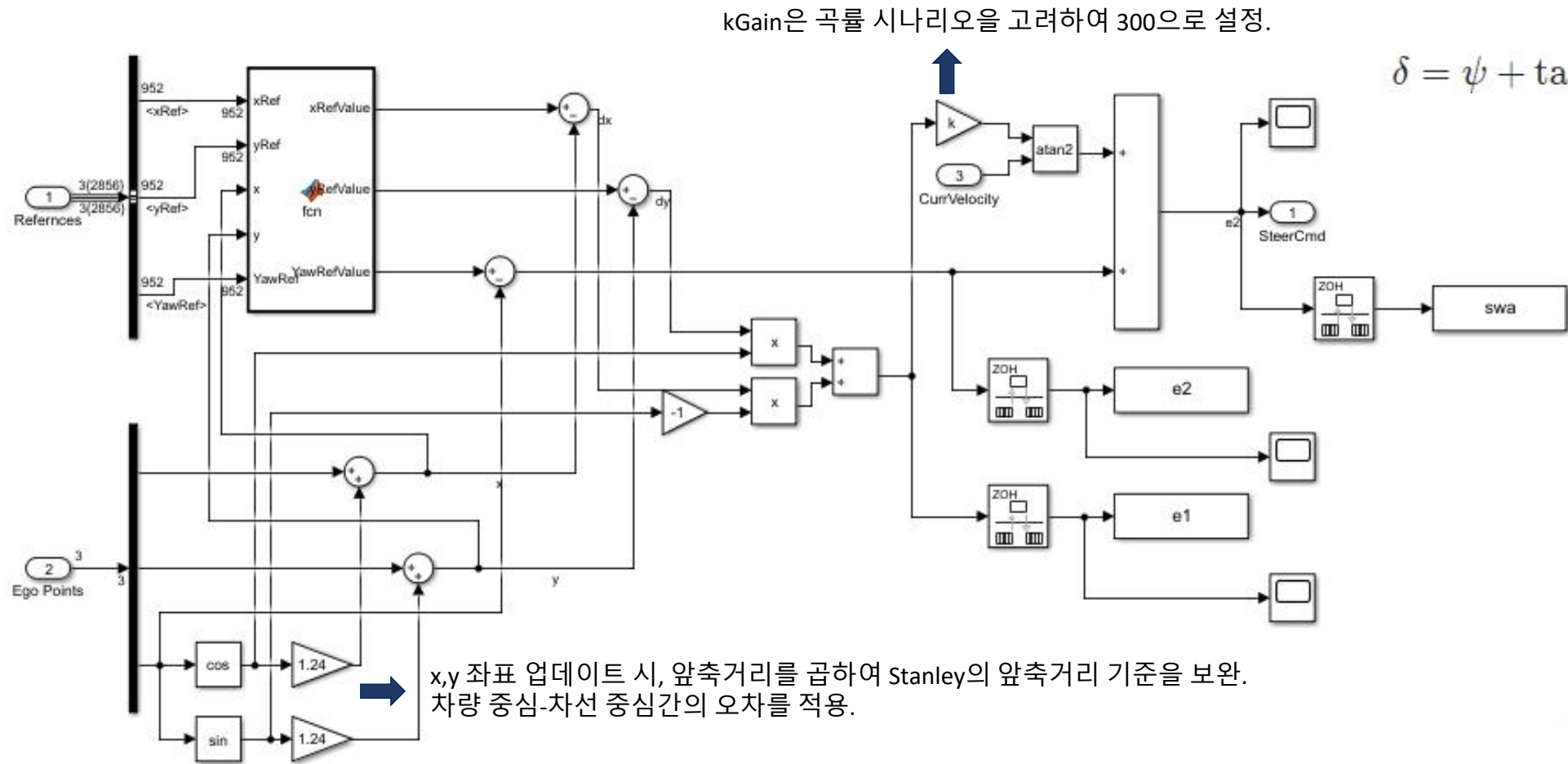
$$y_{Le}(t) = \ln(|x_{Chr}| + |x_{Lad}|) + \alpha \quad (2)$$

$$y_{Lv}(t) = \beta \times \sin(0.5 \times V_s \times \frac{\pi}{180}) \quad (3)$$

형  
D  
부  
시  
지  
의

## Stanley 구조도 및 설명

## Stanley 구조도



## Stanley 구조도 및 설명

## Stanley Function Block

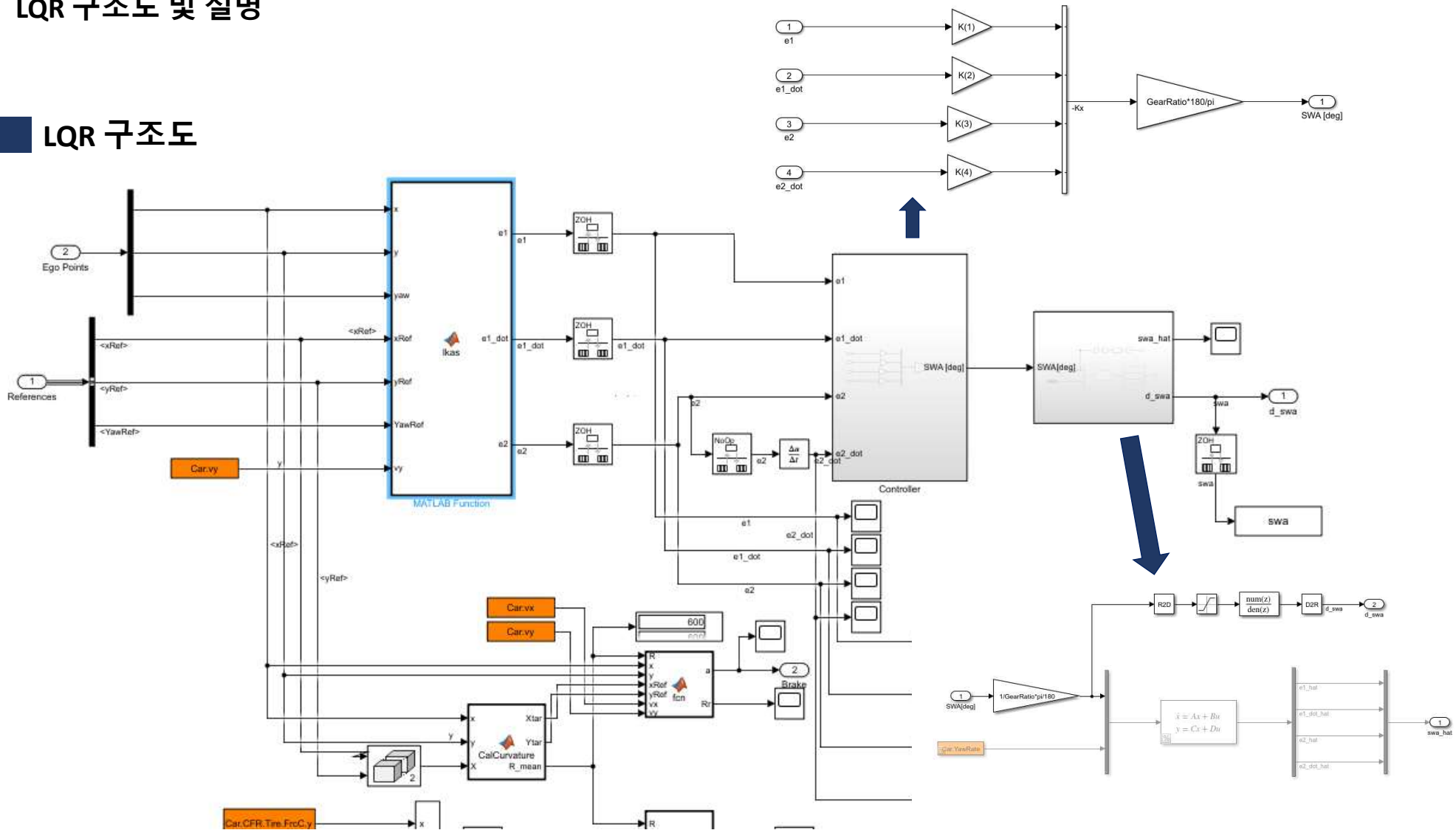
```
function [xRefValue, yRefValue, YawRefValue] = fcn(xRef, yRef, x, y, YawRef)
    [~,idx] = min((xRef-x).^2+(yRef-y).^2);
    if idx < 1
        idx = 1;
    end
    xRefValue = xRef(idx+1);
    yRefValue = yRef(idx+1);
    YawRefValue = YawRef(idx);
end
```

% ego차량의 좌표인 x,y는 Stanley 특성인 앞측 좌표 기준을 차량 중심 좌표로 변경한 좌표임.  
% 최종적으로 차량 중심 좌표와 최단 거리인 Reference좌표를 추출하는 로직.



## LQR 구조도 및 설명

### LQR 구조도



## LQR 구조도 및 설명

## LQR Function Block

```
function [e1, e1_dot, e2] = lkas(x, y, yaw, xRef, yRef, YawRef, vy)

% 가장 가까운 참조 지점을 찾기
distances = sqrt((xRef - x).^2 + (yRef - y).^2);
 [~, minIndex] = min(distances);

% 가장 가까운 참조 지점을 선택
xRefValue = xRef(minIndex);
yRefValue = yRef(minIndex);
YawRefValue = YawRef(minIndex);

% lateral position error 계산
dx = xRefValue - x;
dy = yRefValue - y;
e1 = dx * sin(YawRefValue) - dy * cos(YawRefValue);
% e1 = sqrt((dx).^2 + (dy).^2);

% lateral position error 변화량 계산
e1_dot = vy + 60 * normalizeAngle(yaw - YawRefValue);

% yaw angle error 계산
e2 = normalizeAngle(yaw - YawRefValue);

% 각도 정규화 함수 (lkas 함수 내에 중첩됨)
function angle = normalizeAngle(angle)
    % 각도를 [-pi, pi] 범위로 정규화
    angle = atan2(sin(angle), cos(angle));
end
end
```

## LQR m파일

```
Cr = 98000; % 뒷바퀴 코너링 강성
m = 2044.2; % 차량 질량
Vx = 60; % 차량 속도
lf = 1.314; % 차량 무게중심 ~ 앞축거리
lr = 1.786; % 차량 무게중심 ~ 뒷축거리
Ix = 3558.1; % 차량 z축 관성모멘트
GearRatio = 17; % 기어비
k = 300;

A = [0 1 0 0; 0 -(2*Cf+2*Cr)/(m*Vx) (2*Cf+2*Cr)/m (-2*Cf*lf+2*Cr*lr)/m;
     0 0 1 0; 0 2*Cf/m; 0 2*Cf*lf/Ix];

B1 = [0; 2*Cf/m; 0; 2*Cf*lf/Ix];

B2 = [0; -(2*Cf*lf-2*Cr*lr)/(m*Vx)-Vx; 0; (-2*Cf*lf^2-2*Cr*lr^2)/Ix];

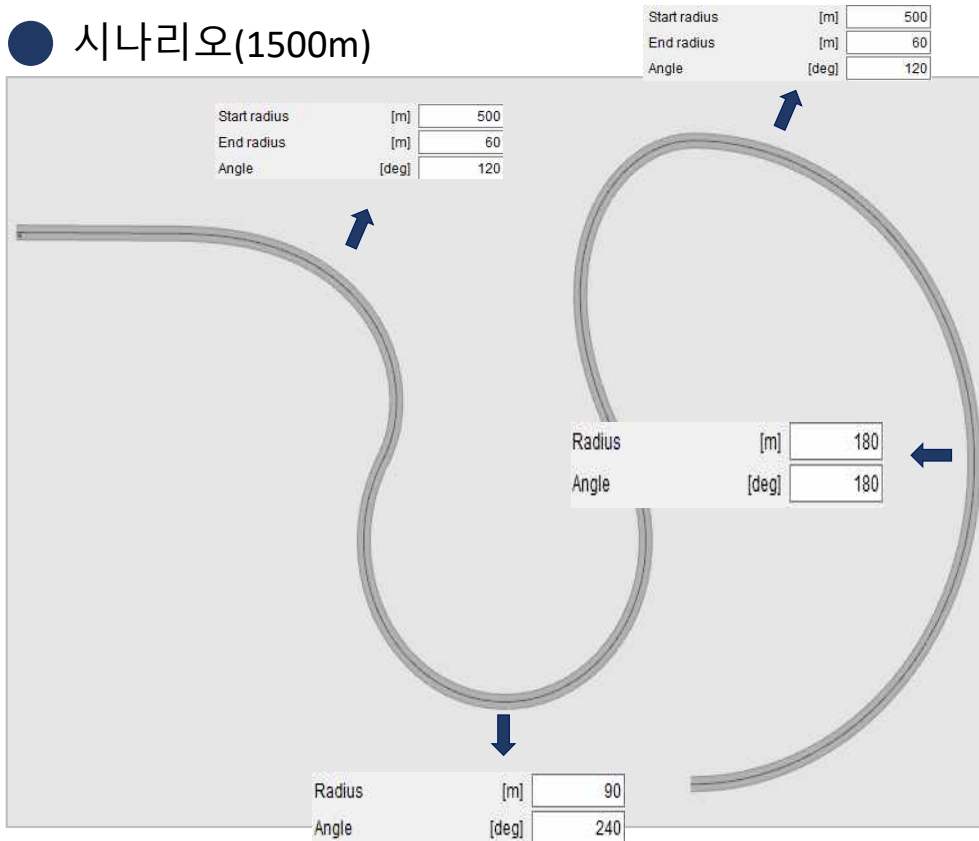
% Q1: 횡방향 이탈거리에 대한 파라미터
% Q2: 드리프트 앵글에 대한 파라미터
Q1 = 3000; % Lateral Offset의 가중치
Q2 = 1; % Drift Angle의 가중치
Q = diag([Q1,1,Q2,1]);
R = 70; % Steering Angle의 가중치
K = lqr(A, B1, Q, R)
```

곡률 시나리오를 고려하여 가중치를 다음과 같이 설정,  
Q1 = 3000, Q2 = 1, R = 70

## Scenario / Road

## Scenario / Road

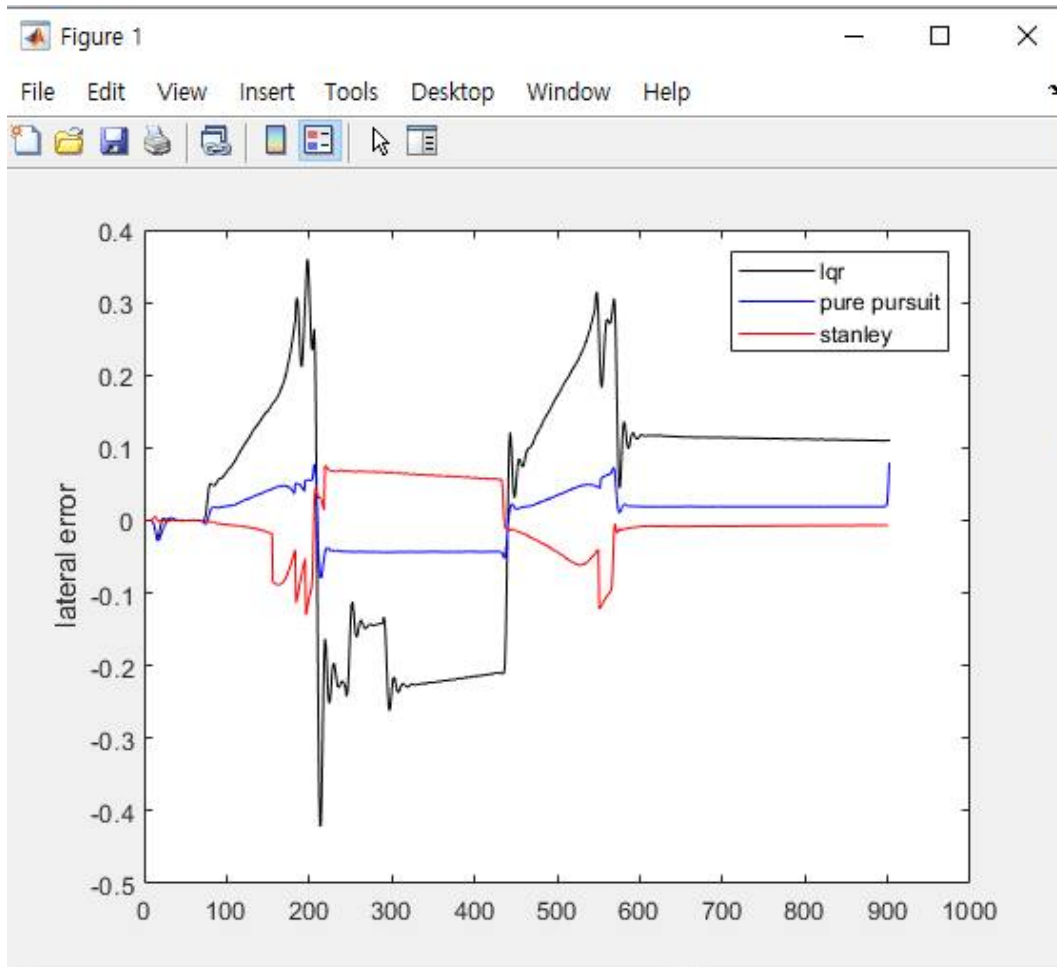
## 시나리오(1500m)



## 횡방향 제어기 성능 비교 분석

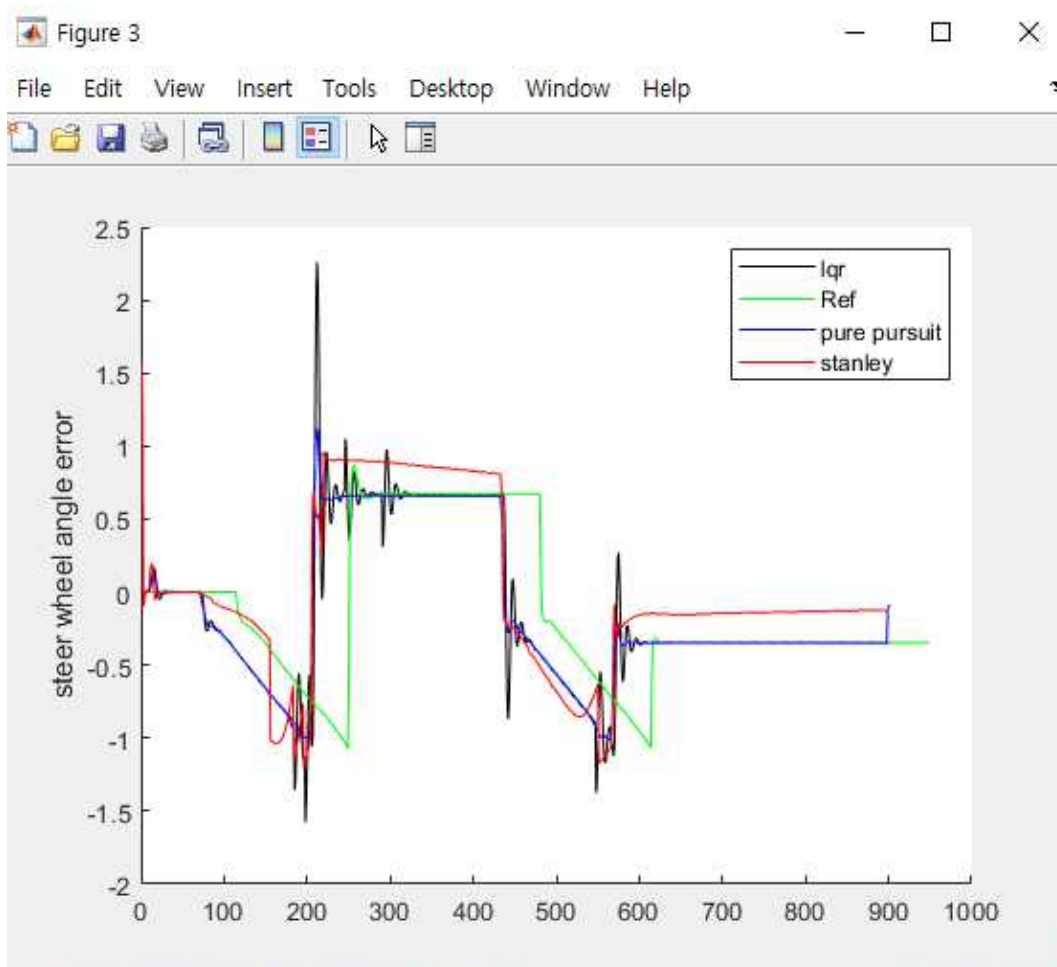
## ■ 횡방향 제어기 성능 비교 분석

## ● e1(Lateral Position Error) 비교분석



## 횡방향 제어기 성능 비교 분석

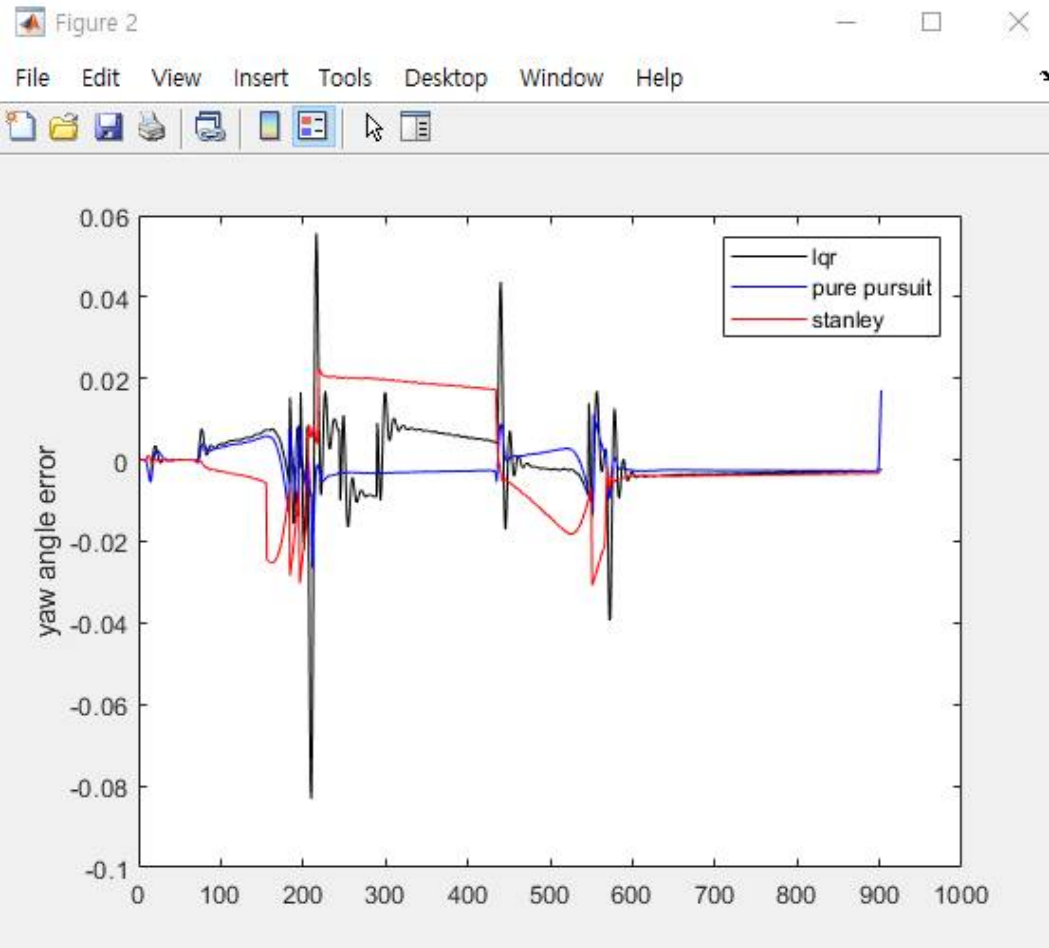
## ■ 횡방향 제어기 성능 비교 분석

●  $e_2$ (Lateral Position 변화량 Error) 비교분석

## 횡방향 제어기 성능 비교 분석

## ■ 횡방향 제어기 성능 비교 분석

## ● swa(Steering Wheel Angle Error) 비교분석



## 횡방향 제어기 성능 비교 분석

### ■ 횡방향 제어기 성능 비교 분석

#### ● 횡방향 제어기 성능 비교 분석

	e1(max)	e1(mean)	e2(max)	e2(mean)	SWA(max)	SWA(mean)
LQR	0.4213	0.1610	0.0832	0.0089	3.1142	0.3988
Pure Pursit	0.0802	0.0331	0.0266	0.0036	1.9665	0.365
Stanely	0.1306	0.0429	0.0308	0.0123	1.9711	0.4152

1. LQR은 비선형 시스템을 선형화하여 제어하기에 제일 성능이 낮음.
2. LQR은 위와 같은 이유로, 코너링 강성이 평균값과 큰 차이를 보이는 곡선 시나리오에서 더욱 성능이 떨어짐.
3. Stanley는 P.P의 Ld 개념이 존재하지 않기에 가장 가까운 점을 쫓음.
4. 위와 같은 이유로 Stanley는 곡률이 심한 도로에서 Pure Pursuit보다 낮은 성능을 보임.
5. Pure Pursuit은 차량의 속도나 전방목표점(ld)에 따라 조향각이 발산할 수 있음.



## 횡방향 융합 제어기 성능 비교 분석을 위한 설계

## Pure Pursuit + Stanley 참고 논문

도심 자율주행에서의 승차감 향상을 위한  
속도 계획 및 제어Motion Planning and Control for Improved Ride Comfort  
in Urban Autonomous Driving장 경 준<sup>1</sup>, 김 학 일<sup>1,\*</sup>(Kyeongjun Jang<sup>1</sup> and Hakil Kim<sup>1,\*</sup>)<sup>1</sup>Department of Electrical and Computer Engineering, Inha University

**Abstract:** Self-driving shuttle services frequently provide a less comfortable experience for passengers than human drivers. This observation emphasizes the importance of motion planning and control methods. This paper proposes a method to improve ride comfort in urban autonomous driving. The path information is utilized for velocity planning to minimize lateral acceleration and limiting the acceleration when controlling the PID to avoid rapid deceleration. Additionally, the hybrid lateral controller increases path following performance. The proposed method proved excellent performance compared to the existing geometric lateral control method. A decision tree was employed to evaluate ride comfort to meet ISO standards. The acceleration and jerk were assessed to determine their impact on ride comfort. Furthermore, the lateral error and the heading error were analyzed to evaluate the stability of the route during autonomous driving. An experiment was conducted and verified in the actual urban environment of Songdo New Town, Incheon, to ascertain the efficacy of the proposed method in enhancing ride comfort.

**Keywords:** autonomous driving, path following, motion planning, path control, ride comfort, decision tree

## 1. 서론

자율주행은 최근 산업 발전에 따라 빠른 속도로 진화하고 있다. 특히, 자율주행의 법 제도와 인시운행허가 같은 규정은 자율주행 기술의 다양한 주제의 연구와 더불어 빠른 발전으로 이끌었다[1-4]. 이러한 기술적 성장은 완전한 자율주행의 시대로의 진입 및 상용화를 기대하며 현재도 센서 기술, 위치 및 맵핑 기술, 인지 및 융합 알고리즘, 차량 제어 이론 및 자동차 공학 등 다양한 분야에서의 연구가 활발히 진행되고 있다.

자율주행 기술은 많은 발전을 이루었지만 현실적인 적용에서 여러 문제점이 눈에 띈다. 특히 자율주행 셔틀 서비스에 대한 소비자 경험에 이 기술의 상용화 속도에 결정적인 영향을 미칠 수 있다. 소비자들이 주행 중 불편함을 느낀다면 자율주행 기술의 상용화가 지연될 가능성이 크다. 실제로 현재 자율주행 셔틀 서비스는 저속으로 운행되는 경우가 많아 이로 인해 승객들은 불편함을 경험한다[5]. 이와 같은 문제를 해결하기 위해 차량의 모션 특성과 그로 인한 승객의 편안함 사이의 관계를 연구하는 것이 중요하다. 특히 차량의 가속도와 저크(jerk)에 따른 주행 편안함을 예측하는 통계 모델이 제안되어 연구되었다[6]. 이러한 자율주행 기술의 상용화를 위해 주행 편안함을 높이는 연구는 자율주행 셔틀 서비스의 품질 향상과 승객의 만족도 증진에 큰 도움이 된다.

이에 따라, 자율주행 자동차의 주행 제어에서 경로 추종 성능만 고려하는 것이 아닌 승차감을 고려하는 것이 중요하다. 국제 표준인 ISO 11270, ISO 15622와 ISO 21717은 지능형 교통 시스템 중 차로 유지 보조 시스템(LKAS, Lane Keeping Assistance System), 적응 순항 제어 시스템(ACC, Adaptive Cruise Control) 그리고 차로 내 부분 자율주행 시스템(PDAS, Partially Automated In-Lane Driving Systems)의 성능 요구사항 및 시험 절차에 대한 내용을 다루고 있다[7-9]. 이 표준에서는 성능 요구사항을 준수하기 위해 가속도와 저크 같은 동역학적 요소를 고려하도록 권장하고 있다. 이러한 요소들은 승차감의 품질을 결정하는 중요한 지표로써 해당 표준의 적용을 통해 승차감의 중요성을 인식하고 그에 따라 차량의 성능을 최적화할 수 있다.

기존의 연구들은 경로 추종의 성능과 함께 승차감을 고려하여 제어 기법을 복합적으로 사용하는 다양한 시도를 통해 진행되었다. 특히, 기하학적 제어 기법인 Pure-Pursuit과 Stanley를 경로에 맞게 비율을 정해 조합각을 결정하는 횡방향 제어를 시도하는 방법[10], 그리고 차량 상태 오차를 이용하여 경로 추종 보정제어를 위해 모델기반 제어 기법을 활용하여 Pure-Pursuit과 결합한 제어 기법이 제안되었다[11].

본 연구에서 제안하는 방법론은 그림 1과 같이 자율주행 시 활용 가능한 정보를 기반으로 하는 속도 계획과 제어 기

## 3.2 횡방향 제어

횡방향 제어는 자율주행 차량의 조향을 담당하여 차량이 지정된 경로를 정확하게 따르도록 한다. 주행 경로를 이탈하지 않으면서 승차감을 크게 저해하지 않도록 하는 것이 중요하다.

기존의 Pure-Pursuit 제어기에는 한계점이 존재한다. 횡방향 오차를 직접적으로 고려하지 않아 센서 오차에 따라 차량이 실제 경로와 벗어나 횡방향 정상 상태 오차를 가진 채 주행할 수 있다. 이 문제를 해결하기 위해, 본 연구에서는 Stanley 제어기의 방법을 착안하여 복합 횡방향 제어기를 제안한다. Stanley 제어기는 횡방향 오차와 해당 오차를 동시에 고려하여 차량의 조향을 결정한다. 이 방법은 경로 추종 성능이 뛰어나지만 급격한 곡률이 발생할 때 민감한 조향 반응을 보여 승차감을 저해시킨다. 본 연구에서는 Stanley 제어기의 횡방향 오차를 고려한 항만 Pure-Pursuit 제어기에 적용하여 식(12)와 같이 복합 횡방향 제어기를 구성한다.

$$\delta_{hybrid} = \tan^{-1} \left( \frac{2\dot{e} \sin \alpha}{l_d} \right) + \tan^{-1} \left( \frac{ke}{v} \right) \quad (12)$$

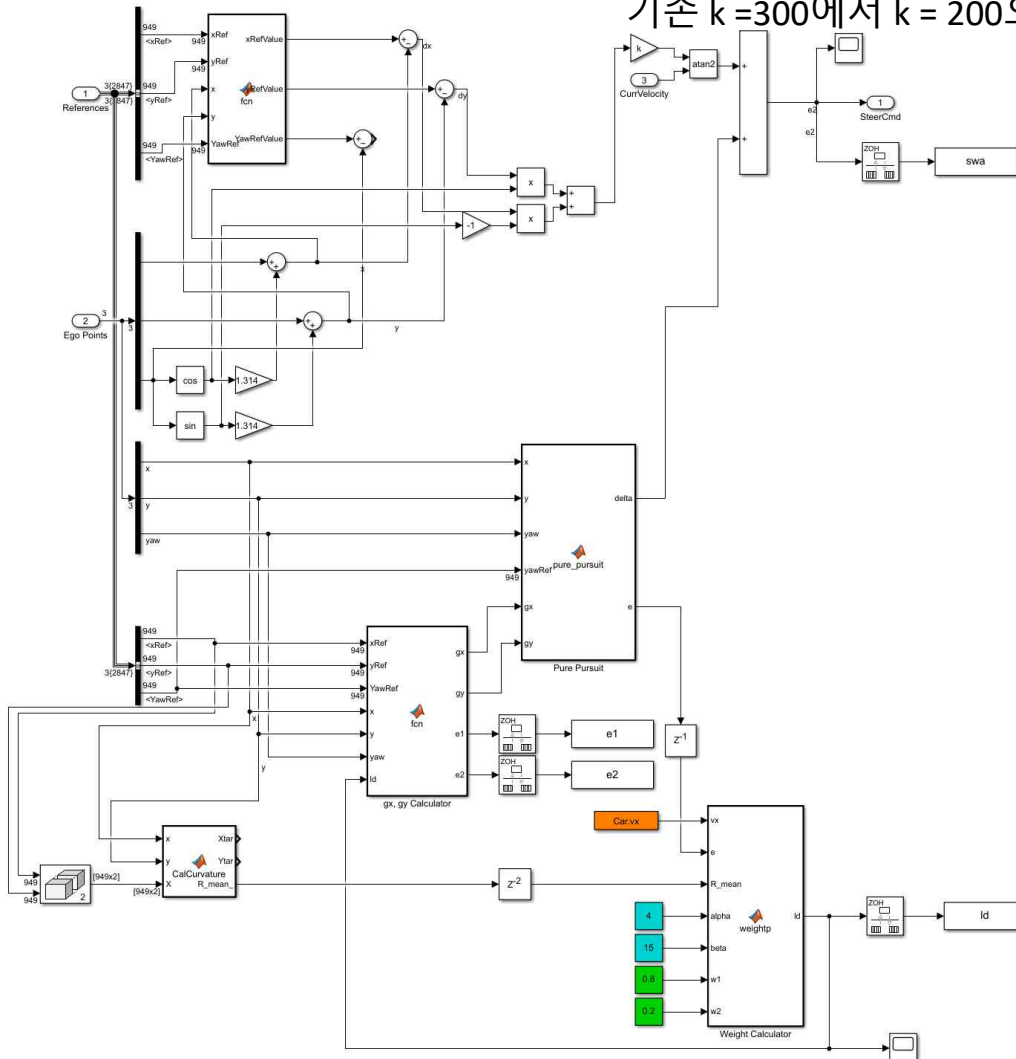


# Pure Pursuit, Stanley, LQR 횡방향 제어 성능 비교 및 설명

## 횡방향 융합 제어기 성능 비교 분석을 위한 설계

### Pure Pursuit + Stanley 구조도

기존  $k=300$ 에서  $k=200$ 으로 변경.



## 횡방향 제어기 성능 비교 분석

### ■ 횡방향 융합 제어기 성능 비교 분석

#### ● 횡방향 융합 제어기 성능 비교 분석

	e1(max)	e1(mean)	e2(max)	e2(mean)	SWA(max)	SWA(mean)
LQR	0.4213	0.1610	0.0832	0.0089	3.1142	0.3988
Pure Pursit	0.0802	0.0331	0.0266	0.0036	1.9665	0.365
Stanley	0.1306	0.0429	0.0308	0.0123	1.9711	0.4152
Pure Pursuit + Stanely	0.0243	0.0076	0.0141	0.0037	1.9015	0.3873

1. P.P + Stanley simulation 시, Stanley 가중치(k) = 300 -> 200으로 줄어듬.
2. 이로부터 곡률이 심한 도로에서 Stanley의 비중이 줄어야 좋은 성능이 나옴을 알 수 있음.
3. Stanley는 e1과 yaw error를 고려하여 제어하므로, P.P보다 P.P + Stanley가 e1 성능이 더 좋음을 알 수 있음.
4. 반면 곡률이 심한 도로에서 조향 반응이 민감한 Stanley의 단점 때문에 P.P보다 swa 성능은 떨어짐을 알 수 있음.

## 횡방향 융합 제어기 성능 비교 분석을 위한 설계

### ■ 다음 목표

1. P.P + Stanley 성능 고도화.
2. P.P + LQR 구현.
3. 위 두 제어기와 비교 가능한 융합 제어기 구현.( 확정X)
4. 구현한 융합 제어기 성능 비교 분석 후, 춘계학술대회 융합 제어기 선별.
5. 선별한 융합 제어기 고도화.

감사합니다.

국민대학교 지능형 차량 신호 처리 연구실 학부연구생 김지원

2024.08.02(금)



국민대학교  
KOOKMIN UNIVERSITY