LAB MEETING

국민대학교 지능형 차량 신호 처리 연구실 학부연구생 김지원

2024.11.29(금)













Sliding Model Control(SMC)

Sliding Mode Control(SMC)

- 1. 비선형 시스템에서 시스템의 동적 특성을 효과적으로 제어하기 위한 강건 제어 기법.
- 2. 준수한 제어 정확도, 강건성, 쉬운 튜닝과 구현이 특징.
- 3. 시스템의 상태가 상태 공간 상의 특정 평면(Sliding surface)에서 움직이도록 설계.
- 4.크게 Sliding surface 설계 단계와 Control input 설계 단계로 나뉨.

Sliding Surface 설계

 $S_1=e(t)$: 1차 Sliding surface 예시

 $S_2=\dot{e}(t)+\lambda e(t)$: 2차 Sliding surface 예시

e(t): 상태 오류

e(t) dot: 상태 오류 미분

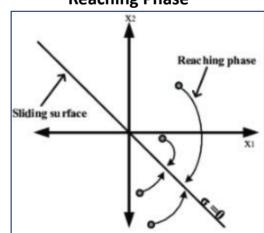
λ: Sliding surface 수렴율

Control input 설계

 $u(t) = -KS(t) \mathrm{sign}(S(t))$: 스위칭 제어 입력 방식 예시

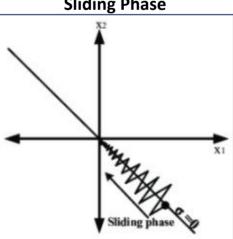


Reaching Phase





Sliding Phase



SMC 참고 논문

Lateral Shared Sliding Mode Control for Lane Keeping Assist System in Steer-by-Wire Vehicles: Theory and Experiments

Gabriele Perozzi , Jagat Jyoti Rath , Chouki Sentouh , Jerome Floris, and Jean-Christophe Popieul

a driv

Abtorat—The lame-keeping assistance design for steer-by-wise road whiches is a multi-objective canted problem that addresses lane tracking, improvement of driver controf and ensuring vehicle stability. The designed architecture must be sensitive to various driver behaviors, provide assistance to drivers whenever required and ensuring vehicle satisfactors along with various legal and ethical problems (3). Such issues have made the commercialization of fluid and ensure as mount transition of authority between manual and the control of the problems (3). Such issues have made the commercialization of fluid patomated vehicles as very difficult task. Faced with such issues, and the control of control of t

perative control, lane keeping assist system.

DVANCED autonomy features in vehicles have shown A DVANCED autonomy reatures in ventures and comfort of human drivers, especially when travel duration increases. With the ever increasing popularity of automated vehicles several features such as automated lane keeping, adaptive cruise control, blind spot recognition, active suspension control among others have been widely researched [1], [2]. However, development

Manuscript received 1.5 January 2021; revised 9 February 2021, 15 February 2021, and 15 May 2021; accepted 8 July 2021. Date of publication 1.6 July 2021; 2021.

National Research Agency through the finanework of CoCoVelA Project ANR-194-CE2-20009-01, in part by the European Union with the European Regional Development Public Anderson Comment of CoCoVelA Project ANR-194-CE2-20009-01, in part by the European Union with the European Regional Development Public 40-France Regional Comment of CoCoVelA Project ANR-194-CE-20008-01, in part by the European Union with the European Regional Comment of CoCoVelA Project ANR-194-CE-20008-01, in part by the European Union with the European Regional Comment of CoCoVelA Project ANR-194-CE-20008-01, in part by the European Union William Cocordon (CoCoVelA) (Cocordon Cocordon (Cocordon Cocordon (Cocordon Cocordon (Cocordon Cocordon (Cocordon (Cocordon

19-Citi22-009-401, in part by the European Union with the European Regional Development Fund, the Frunch State and the Haust-edy-Carme Region under the Proceedings of the Proceedings of the Processing of the Processing of the Processing Office of Automatic Control, LAMILLY Globelle Petrozzi, Chouki Sensouh, Jerome Fonis, and Jean-Christophe Poppeal are with the Department of Automatic Control, LAMILLY Company of the Processing Office of the Processing Office of Automatic Control, LAMILLY Company of the Processing Office of Automatic Control, LAMILLY Company of the Processing Office of Automatic Control, LAMILLY Company of the Processing Office of the Processing O

Authorized licensed use limited to: Kookmin University, Downloaded on November

III CONTROL SYSTEM ARCHITECTURE

The design of a robust controller for the LKA task is fornulated to achieve multiple objectives related to lane keeping performance, vehicle stability and shared control performa These objectives can be briefly summarized as:

- · minimizing the lateral deviation and the heading error; · heightened sensitivity to assist the driver in the shared
- control mode;

 smooth transition between autonomous and manual modes
- to enhance the driver's comfort To achieve the above objectives a quasi-continuous SMC approach is proposed for the LKA task with the human driver

nitoring the driving action and having absolute authority in conflicting situations.

The error surface for minimizing lane tracking position and orientation errors is designed as:

$$e = k_1 l_\mu \psi_l + k_2 y_l$$
, (5)

where k_1 , $k_2 > 0$ are design parameters to be tuned in order to weight the influence of the lateral deviation error and the heading error on the sliding surface convergence. These sliding surface gains can be easily designed to ensure convergence of the sliding surface, have been proposed in SMC literature for design of the surface gains [38]. For the sliding surface considered in our paper, one can thus easily design the gains such that the lane error dynamics are stable. As the relative degree of the system of the error dynamics (5) is computed as:

$$\ddot{e} = k_1 l_p \vec{\psi}_l + k_2 \vec{y}_l$$
,

and substituting eqs. (3), (1) in eq. (6) the second derivative Under the assumptions that the disturbance Δ is bounded, there

$$\ddot{e} = f + U + \Delta$$
,

ear function f, the lumped disturbance terms is represented as system (see (2) in [39]): Δ and U represents the influence of the assistance control δ_{fa} ω to account for the sharing of control authority, these variables

$$f = f(X, \delta_{fm}) = F_r \left(\frac{k_2}{m} - \frac{l_r l_p}{l_x} (k_1 + k_2)\right)$$

$$+ \delta_{fmic} C f \left(\frac{l_p l_f}{l_x} (k_1 + k_2) + \frac{k_2}{m}\right),$$

$$\Delta = \Delta (F_w, \rho_r, \dot{\rho}_r) = F_w \left(\frac{l_p l_w}{l_x} (k_1 + k_2) + \frac{k_2}{m}\right)$$

$$- \rho_r k_2 v^2 - \dot{\rho}_r k_2 v_e l_p,$$
(6)

 $U = U(\delta_{fa}) = \delta_{fa}(1 - \omega) \left(C_f \frac{l_p l_f}{l_s}(k_1 + k_2) + \frac{k_2}{m}\right)$ With the goal of stabilizing the error dynamics, the objective is finite-time convergent. then to design the control input δ_{fa} which can reject the effect of

that component of the disturbance admits a fixed upper bound i.e., $|\Delta| \leq \overline{\Delta}$ for some known constant $\overline{\Delta} \geq 0$. Accordingly, we assume boundedness of the lateral force generated by the wind assume boundedness of the factor force generated by the winder $F_w \ge 0$ and boundedness of road curvature $|\rho_r| < \bar{\rho}_r$, $|\dot{\rho}_r| < \bar{\rho}_r$ for some known $\bar{\rho}_r > 0$, $\bar{\rho}_r > 0$

BEE TRANSACTIONS ON INTELLIGENT VEHICLES, VOL. 8, NO. 4, APRIL 202

respecting the road surface. Then, considering that the states of the system are bounded,the upper-bound of the disturbance Δ can be computed as

$$|\Delta(F_w, \rho, \hat{\rho})| = |F_w| \left(\frac{l_p l_w}{I_s} (k_1 + k_2) + \frac{k_2}{m}\right)$$

 $+ |l_{\rho r}| k_2 v^2 + |\hat{\rho}_r| k_1 v_s t_p$
 $\leq \tilde{F}_w \left(\frac{l_p l_w}{I_s} (k_1 + k_2) + \frac{k_2}{m}\right)$
 $+ \tilde{\rho}_r k_2 v^2 + \tilde{\rho}_r k_1 v_s l_p$
 $\leq \tilde{\Delta}(F_w, \rho, \hat{\rho}).$

The control $U(\delta_{fa})$ can be designed as

 $U(\delta_r) = -f + \tilde{u}_r$

where \tilde{u} is an auxiliary control input to be synthesized using the

quasi-continuous SM approach as

$$\tilde{u} = -\tilde{\Delta}(F_w, \rho, \tilde{\rho}) \frac{|\tilde{e}|^2 \operatorname{sign}(\tilde{e}) + \alpha e}{|\tilde{e}|^2 + \alpha |e| + \beta},$$
 (12)

and where $\beta>0$ is a small constant introduced to reduce the chattering (its influence is explained in Section III-B), $\alpha>0$ is a design parameter to be tuned. Employing the above auxiliary control input, the error dynamics can be rewritten as

$$\tilde{e} = -\tilde{\Delta}(F_w, \rho, \dot{\rho}) \frac{|\dot{e}|^2 \operatorname{sign}(\dot{e}) + \alpha e}{|\dot{e}|^2 + \alpha |e| + \dot{\beta}} + \Delta(F_w, \rho, \dot{\rho}). \quad (13)$$

is not imprecision of values of model parameters, and there are not digital and measurement noises, it can be shown that $e = \dot{e} = 0$ is reached in a finite time and the chattering is suppressed. where the known plant dynamics are represented by the nonlin- Let's rewrite the system in the generic form as double integrator

$$\ddot{e}(t) = g(t, X(t))u(t) + h(t, X(t)),$$

where $X(t) = [x(t), \dot{x}(t)]^T \in \mathbb{R}^2$ is the state vector, $u(t) \in \mathbb{R}$ is the control input, two functions $g: \mathbb{R}^3 \to \mathbb{R}$ and $h: \mathbb{R}^3 \to \mathbb{R}$ ensure existence and uniqueness of the system solutions. In addition, there are two known $g: \mathbb{R}^3 \to \mathbb{R}$ and $\tilde{h}: \mathbb{R}^3 \to \mathbb{R}$ such that $\forall X \in \mathbb{R}^2$ and $t \geq 0$ (see (17) in [39]):

$$g(t,X) \ge \underline{g} > 0, \ |h(t,X)| \le \overline{h}.$$
 (15)
The following quasi-continuous SMC can be proposed:

$$u(t, X) = -\frac{\hbar + \gamma}{\underline{q}} \frac{|\dot{e}|^2 \operatorname{sign}(\dot{e}) + \alpha e}{|\dot{e}|^2 + \alpha |e|}.$$
 (1)

Theorem 1: Consider the system (14) and assume the restric tions (15) are satisfied, then there exist $\gamma>0$ sufficiently big and $\alpha>0$ such that the control (16) makes the system globally

isturbances \(\Delta\). To design a robust controller, it is often assumed of Theorems 4.2 and 4.1 in 1391, which lead to the validity of Authorized licensed use limited to: Kookmin University, Downloaded on November 06,2024 at 08:21:22 UTC from EEE Xplore. Restrict

논문 아키텍쳐

- 1. 운전자-제어기 간의 매끄러운 권한 전환 및 공유 제어에 초점을 맞춘 아 키텍처 제안.
- 2. 운전자 모델 의존성 제거를 위해 스티어 바이 와이어(steer by wire) 기능 을 가정
- 3. 시스템은 제어와 관련하여 상대 차수가 2가 됨.
- 4. 시간 가변 이득을 갖춘 고차 준연속 SMC(HOSMC: Higher Order Quasi Continuous Sliding Mode Control)를 제안.

📄 논문 주요 핵심

복잡성, 보수성을 줄이기 위해, 외부 방해 요인의 상한값에 기반하여 계산 된 시간 가변 이득을 사용.

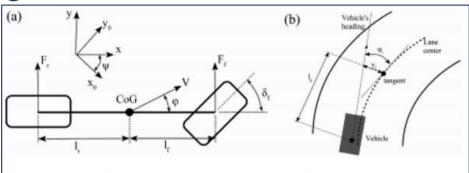
-운전자-제어기 간의 권한 관리는 운전자로부터 직접적으로 파생되는 연 속적인 공유 매개변수를 통해 보장.



- 1. 횡방향, 요 각 오차 최소화.
- 공유 제어 모드에서 운전자를 지원하기 위한 높은 민감도.
- 3. 자율 모드와 수동 모드 간의 부드러운 전환을 통한 운전자 편안함 향상.

SMC 논문 시스템 수식 정리

Vehicle Model



$$\begin{cases} m\dot{v}_y &= F_r + F_f - mv_x\dot{\psi} + F_w \\ I_z\ddot{\psi} &= -l_rF_r + l_fF_f + l_wF_w \end{cases},$$



$$F_r = C_r \frac{l_r \dot{\psi} - v_y}{v_x}, \quad F_f = C_f \left(\delta_f - \frac{l_f \dot{\psi} + v_y}{v_x} \right)$$

Ff: 앞바퀴에 적용되는 횡방향 힘

Fr: 뒷바퀴에 적용되는 횡방향 힘

Cf: 앞바퀴 코너링 강성

Cr: 뒷바퀴 코너링 강성

δf: 타이어 조향각

- vy : 횡방향 차량 속도
- vx : 종방향 차량 속도(일정하다고 가정)
- Ψ: 요(yaw) 각
- lz: 요(yaw) 관성 모멘트
- lf: 차량 무게중심 ~ 앞바퀴 축 거리
- lr: 차량 무게중심 ~ 뒷바퀴 축 거리
- lw: 바람이 차량에 영향을 미치는 지점까지 거리
- Fw: 바람에 의해 발생하는 공기역학적 횡방향 힘

Vehicle-Road Model

$$\begin{cases} \dot{\psi}_l &= \dot{\psi} - \rho_r v_x \\ \dot{y}_l &= v_y + l_p \dot{\psi} + \psi_l v_x \end{cases}$$

- vl: 횡방향 오차
- ψl: 요(yaw) 각 오차
- pr: 도로 곡률
- lp: 차량의 무게중심에서 전방을 바라보는 거리

Driver-Vehicle-Road Interaction

$$\delta_f = (1 - \omega)\delta_{fa} + \omega\delta_{fm}$$
 $\delta_{fm} = \frac{\delta_d}{R_s}$

- δf: 최종 출력 조향각
- δfa: 제어 시스템 입력 조향각
- δfm: 최종 운전자 조향각
- w: 운전자-제어기 간의 조향 가중 매개변수
- δd: 운전자가 스티어링 휠에 입력한 조향각
- Rs: 운전자 조향 감소 비율
- w = 1: δf =δfm인 완전 수동 모드 상황
- w = 0: δf =δfa인 완전 자율 제어 모드 상황

iV57

Sliding Model Control(SMC)

- SMC 논문 제어기 수식 정리
- 고차 준연속 SMC 기반 오차면

$$e = k_1 l_p \psi_l + k_2 y_l \ \ddot{e} = k_1 l_p \ddot{\psi}_l + k_2 \ddot{y}_l$$

k1, k2 > 0: 시스템 상태의 오차면 수렴성을 보장하는 매개변수

● 묶음 외란 항(바람, 곡률 고려)△

$$\Delta = \Delta(F_w,
ho_r,\dot
ho_r) = F_w\left(rac{l_p l_w}{I_z}(k_1+k_2) + rac{k_2}{m}
ight) -
ho_r k_2 v^2 - \dot
ho_r k_1 v_x l_p$$

● 강건 제어기 설계를 위한 외란 상한(바람, 곡률 고려) ᄌ

$$|\Delta(F_w, \rho, \dot{\rho})| = |F_w| \left(\frac{l_p l_w}{I_z} \left(k_1 + k_2 \right) + \frac{k_2}{m} \right)$$

$$+ |\rho_r| k_2 v^2 + |\dot{\rho}_r| k_1 v_x l_p$$

$$\leq \overline{F}_w \left(\frac{l_p l_w}{I_z} \left(k_1 + k_2 \right) + \frac{k_2}{m} \right)$$

$$+ \overline{\rho}_r k_2 v^2 + \overline{\dot{\rho}}_r k_1 v_x l_p$$

$$< \overline{\Delta}(F_w, \rho, \dot{\rho}).$$

● Plant 동역학 기반 비선형 함수 f (기본 제어 입력)

$$f=f(X,\delta_{fm})=F_r\left(rac{k_2}{m}-rac{l_rl_p}{I_z}(k_1+k_2)
ight)+\delta_{fm}\omega C_f\left(rac{l_pl_f}{I_z}(k_1+k_2)+rac{k_2}{m}
ight)$$

Driver-Vehicle-Road Interaction

$$U=U(\delta_{fa})=\delta_{fa}(1-\omega)\left(C_frac{l_pl_f}{I_z}(k_1+k_2)+rac{k_2}{m}
ight)$$

lacksquare 준연속 SMC 접근법에 의해 합성되는 보조 제어 입력 $ilde{u}$

$$ilde{u} = -\Delta(ar{F}_w,
ho,\dot{
ho})rac{|\dot{e}|}{2} ext{sign}(\dot{e}) + lpha erac{|\dot{e}|}{2} + lpha |e| + eta,$$

β>0: 체터링을 줄이기 위해 도입되는 양수 파라미터 α>0: 보조 제어 입력 조정을 위한 설계 파라미터

최종 제어 입력 U

$$U(\delta_{fa}) = -f + \hat{v}$$

■ 바람 영향 제거 및 완전 자율 모드화 수식

w = 0 -> 완전 자율 제어 모드 적용

 δ fm = 0-> 운전자 조향 입력 제거(δ f = δ fm)

Fw = 0 -> 바람의 영향 및 공기역학적 횡방향 힘 제거

If = 0 -> 바람이 차량에 영향을 미치는 거리 제거

● 묶음 외란 항△

$$\Delta = \Delta(F_w,
ho_r,\dot{
ho}_r) = F_w\left(rac{l_p l_w}{I_z}(k_1+k_2) + rac{k_2}{m}
ight) -
ho_r k_2 v^2 - \dot{
ho}_r k_1 v_x l_p$$

● 강건 제어기 설계를 위한 외란 상한(바람, 곡률 고려)

$$|\Delta(F_w, \rho, \dot{\rho})| = |F_w| \left(\frac{l_p l_w}{I_z} \left(k_1 + k_2 \right) + \frac{k_2}{m} \right)$$

$$+ |\rho_r| k_2 v^2 + |\dot{\rho}_r| k_1 v_x l_p$$

$$\leq \overline{F}_w \left(\frac{l_p l_w}{I_z} \left(k_1 + k_2 \right) + \frac{k_2}{m} \right)$$

$$+ \overline{\rho}_r k_2 v^2 + \overline{\dot{\rho}}_r k_1 v_x l_p$$

$$\leq \overline{\Delta} \left(\overline{F_w}, \rho, \dot{\rho} \right).$$

● 고차 준연속 SMC 기반 오차면

$$e = k_1 l_p \psi_l + k_2 y_l \quad \ddot{e} = k_1 l_p \ddot{\psi}_l + k_2 \ddot{y}_l$$

● 준연속 SMC 접근법에 의해 합성되는 보조 제어 입력

$$ilde{u} = -\Delta(ar{F}_w,
ho,\dot{
ho})rac{|\dot{e}|}{2} ext{sign}(\dot{e}) + lpha erac{|\dot{e}|}{2} + lpha |e| + eta,$$

시스템 상태를 오차면에 수렴시키는 오차 기반 제어 항

Plant 동역학 기반 비선형 함수 f (기본 제어 입력)

$$f=f(X,\delta_{fm})=F_r\left(rac{k_2}{m}-rac{l_rl_p}{I_z}(k_1+k_2)
ight)$$
 for $m\omega C_f\left(rac{l_pl_f}{I_z}(k_1+k_2)+rac{k_2}{m}
ight)$

차량(플랜트) 동역학 기반 제어 항

Driver-Vehicle-Road Interaction

$$U=U(\delta_{fa})=\delta_{fa}(1-\omega)\left(C_frac{l_pl_f}{I_z}(k_1+k_2)+rac{k_2}{m}
ight)$$

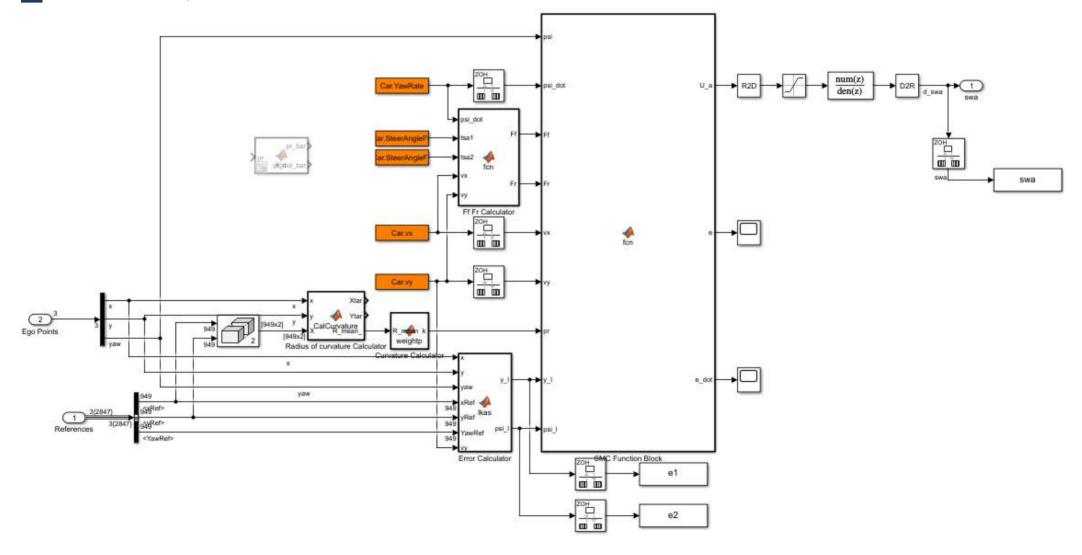
곡률을 고려한 외란 보상을 위한 상한 항 (강건 제어를 위해 상한값 사용)

● 최종 제어 입력 U

$$U(\delta_{fa}) = -f + \tilde{u}$$



SMC Simulink 구조도





Sliding Model Control(SMC)

SMC Function Block

psi l dot = psi dot -pr*vx; % psi l 변화율

y l dot = vy + lp*psi dot + psi l*vx; % y l 변화율

```
function [U a, e, e_dot] = fcn(psi, psi_dot, Ff, Fr, vx, vy, pr, y_l, psi_l)
% Ff: 앞바퀴에 적용된 힣방향 힘
% Fr: 뒷바퀴에 적용된 횡방향 힘
% psi 1: 차량 혜딩 오차
% v 1: 횡방향 편차 오차
% psi 요 각도(yaw)
% pr: 도로 곡률
                                                       % 오차면 설계 공식
% lw: 바람이 차량에 영향을 미치는 지점까지의 거리(고려 X)
                                                       e = k1*lp*psi l + k2*y l;
% Fw: 바람에 의해 발생하는 횡방향 공력 (고려 X)
                                                       e dot = k1*lp*psi l dot + k2*y l dot;
% w: %운전자 개입 정도(0~1) (고려 X)
                                                       % f: 플랜트 동역학을 표현하는 비선형 함수
                                                       f = Fr*(k2/m - (lr*lp)/Iz*(k1 + k2)); %+ delta fm*w*Cf*((lp*lf)/(Iz(k1 + k2)) + k2/m);
lp = 1/(1+12*pr); % 차량 무게 중심에서 앞을 바라보는 거리
m = 2044.2; % 차량 질량
                                                       alpha = 5.2; % 조정할 설계 파라미터(alpha > 0)
Iz = 3558.1;% 요 관성 모덴
                                                       beta = 5.2; % 채터링을 줄이기 위해 도입된 양수 파라미터(beta > 0)
1f = 1.314; % 암축 거리
1r = 1.786; % 뒷축 거리
                                                       % trifpp bar: 방해항 상한
Cf = 110000; % 앞바퀴 코너링 강성
                                                       trifpp bar = abs(pr bar)*k2*sqrt(vx^2 + vy^2)^2 + abs(pr dot bar)*k1*vx*lp;
Cr = 98000; % 뒷바퀴 코너링 강성
                                                       % u: 준연속 SM 접근법을 사용하여 합성할 보조 제어 입력
pr bar = 0.0148; % 도로 곡률 최대값(외란 상한 파라미터)
                                                       u = -trifpp_bar^*((abs(e_dot)^2)^*sign(e_dot) + (alpha^*e))/(abs(e_dot)^2 + alpha^*abs(e) + beta);
pr dot bar = 0.1816; % 도로 곡륨 변화율 최대값(외란 상한 파라미터)
                                                       % 오차 동역학을 안정화하는 것을 목표로 방해항 영향을 배제할 수 있는 제어 입력
% k1,k2>0는 횡방향 편차 오차와 혜딩 오차가 슬라이딩 면의 수렴에
                                                       Ua = -f + u;
% 미치는 영향을 가중하기 위해 조정할 설계 매개변수
k1 = 1.6:
k2 = 1.6;
```



i**V**57

Sliding Model Control(SMC)

Ff, Fr Calculator

```
function [Ff, Fr] = fcn(psi_dot, tsa1, tsa2, vx, vy) %tsa: Tire Steer Angle lf = 1.314; % 앞축 거리 lr = 1.786; % 뒷축 거리 Cf = 110000; % 앞바퀴 코너링 강성 Cr = 98000; % 뒷바퀴 코너링 강성 tsa = (tsa1 + tsa2)/2;  F_f = Cf^*(tsa - (lf^*psi_dot + vy)/vx); % 앞바퀴에 적용된 횡방향 힘 Fr = Cr^*(lr^*psi_dot - vy)/vx; % 뒷바퀴에 적용된 횡방향 힘
```

Error Calculator

```
function [y 1, psi 1] = 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);
   vRefValue = vRef(minIndex);
   YawRefValue = YawRef(minIndex);
   % lateral position error 계산
   dx = xRefValue - x;
   dy = yRefValue - y;
   y 1 = dx * sin(YawRefValue) - dy * cos(YawRefValue);
   % e1 = sqrt((dx).^2 + (dy).^2);
   % lateral position error 변화량 계산
   % y l dot = vy + 60 * normalizeAngle(yaw - YawRefValue);
   % yaw angle eorror 계산
   psi_1 = normalizeAngle(yaw - YawRefValue);
   % 각도 정규화 함수 (1kas 함수 내에 중첩됨)
   function angle = normalizeAngle(angle)
      % 각도를 [-pi, pi] 범위로 정규화
       angle = atan2(sin(angle), cos(angle));
```

Curvature Calculator

```
function [Xtar, Ytar, R mean ] = CalCurvature(x,y,X)
%% Tuning Parameters
BACK num=0;
tar num=50;
tempX=zeros(1,tar num);
tempY=zeros(1,tar num);
Xm=X(:,1);
                      XY = [Xtar', Ytar']:
Ym=X(:,2);
                      N = size(XY, 1);
%% Path Logic
                      dims = size(XY, 2):
Xm first=Xm';
Ym first=Ym';
                     if dims == 2
endPoint num = 50;
                          XY2 = [XY, zeros(N, 1 function [R1, k1] = circumcenter(A1, B1, C1)
                                                   D1 = cross(B1-A1, C1-A1);
dist=sqrt((Xm_first-x end
                                                   b1 = norm(A1-C1);
[~,index]=min(dist);
                                                   c1 = norm(A1-B1);
                      R = zeros(path L, 1);
StartPoint=index-BACK R_valid = zeros(path_L-3,
                                                   if nargout == 1
endPoint=index-BACK n ii = 0;
                                                       a1 = norm(B1-C1);
if StartPoint<1, Star for i = 3:path_L-3
                                                       R1 = a1 * b1 * c1 / 2 / norm(D1);
                         ii = ii+1:
if endPoint>length(Xm
                          [R(i), \sim] = circumcen
                                                       if norm(D1) == 0
                          R valid(ii) = R(i);
tempX(1,1:endPoint-St
                                                            R1 = Inf;
tempY(1,1:endPoint-St end
                                                       end
Xtar=tempX:
                      R valid(R valid > 600) =
                                                        return
Ytar=tempY;
                      len=sum(Xtar~=0)-3;
                      if len < 1
%% Curvature Cal
                          len = 0:
                                                   E1 = cross(D1, B1-A1);
path L = 50;
                                                   F1 = cross(D1, C1-A1);
Xtar = Xtar(1:path_L) R valid(len+1:end,1)=600;
                                                   G1 = (b1^2 * E1 - c1^2 * F1) / norm(D1)^2 / 2;
Ytar = Ytar(1:path L)
                      R mean = zeros(length(R v
                                                    R1 = norm(G1);
                                                   if R1 == 0
                      for id = 1:length(R valid
                                                       k1 = G1;
                          R mean(id) = mean(R v
                                                    elseif norm(D1) == 0
                                                       R1 = Inf:
                      R mean =mean(R mean);
                                                       k1 = D1:
                                                   else
                                                        k1 = G1' / R1^2;
                                                   % Radius Limit 추가
                                                   if abs(R1) >= 1e10 %1e10
                                                       R1 = sign(R1)*1e10; %1e10
```



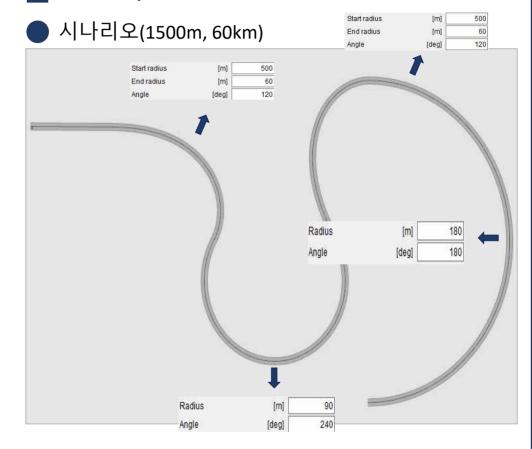
iV57

Sliding Model Control(SMC)

SMC Parameter 설정

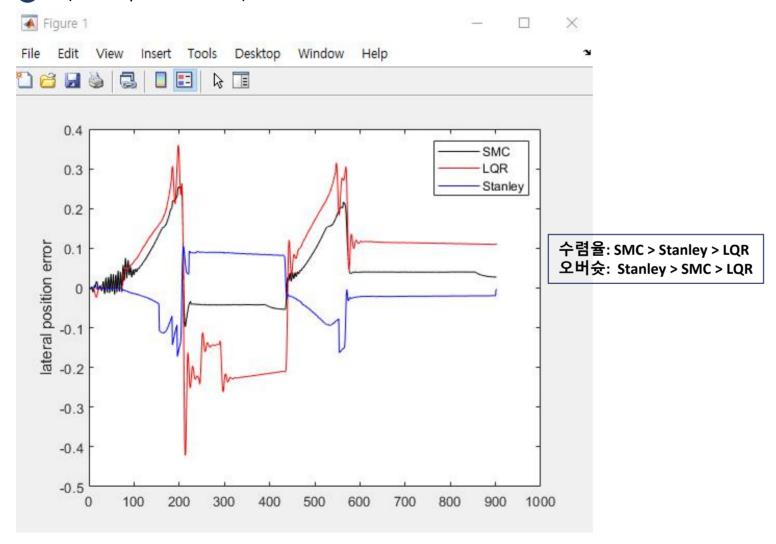
- lp: 차량 무게 중심에서 앞을 바라보는 거리
- 해당 곡률 시나리오 기준 lp > 1.6m부터는 경로이탈 발생.
- 따라서 곡률(pr)을 고려한 수식으로 정의 -> lp = 1/(1 + 12*pr)
- k1, k2 > 0: 시스템 상태의 오차면 수렴성을 보장하는 매개변수
- 값이 크면 Over steering 발생 및 경로이탈.
- 값이 작으면 Under steering 발생 및 경로이탈.
- 두 값 모두 적절한 값인 1.6으로 설정.
- β>0: 체터링을 줄이기 위해 도입되는 양수 파라미터
- α>0: 보조 제어 입력 조정을 위한 설계 파라미터
- alpha가 작으면 e1, e2 크게 증가
- alpha가 크면 e1은 감소하지만 e2 증가, jerk 크게 증가
- beta가 작으면 steering wheel 크게 털림
- beta가 크면 e1, e2 증가
- 두 값 모두 적절한 값인 5.2로 설정.

Scenario / Road

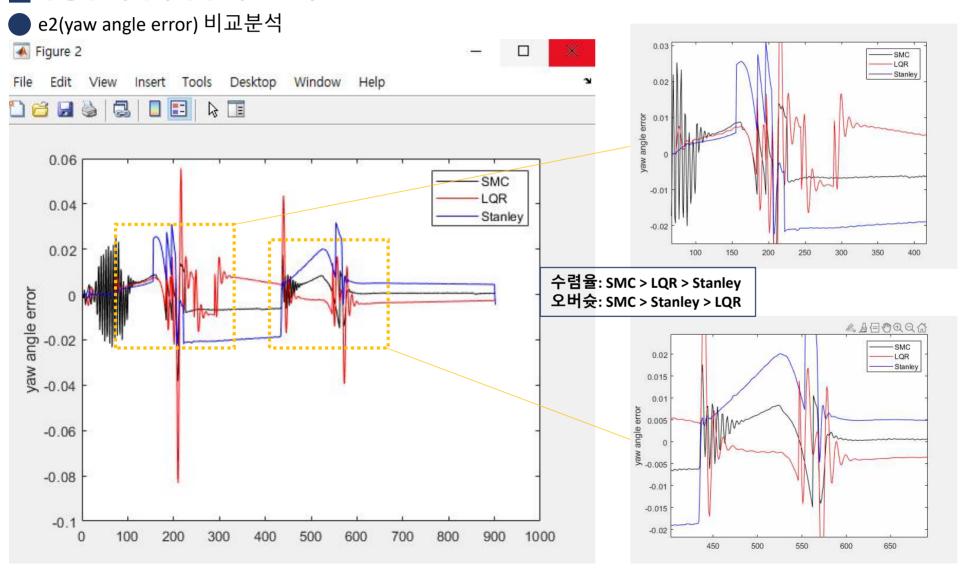




- 횡방향 제어기 성능 비교 분석
- e1(lateral position error) 비교분석



■ 횡방향 제어기 성능 비교 분석

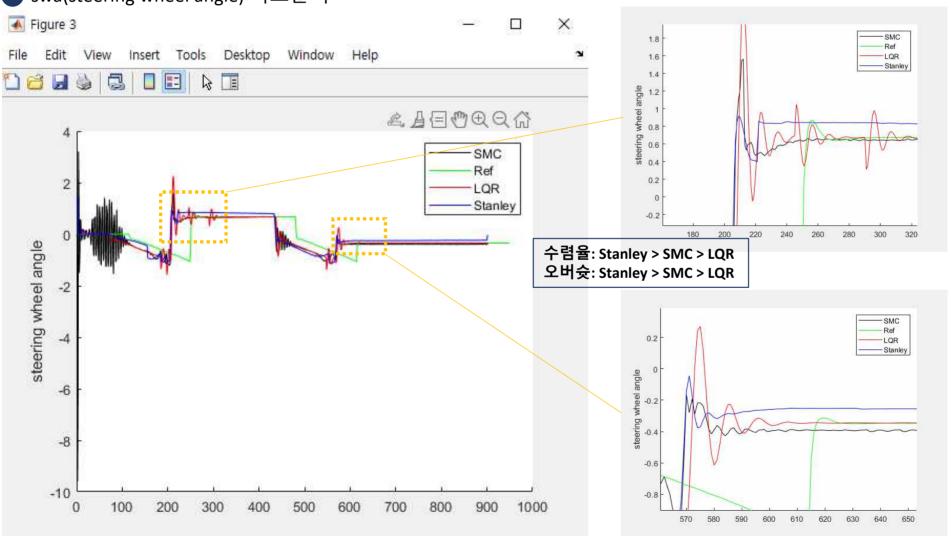


iV57

Sliding Model Control(SMC)

■ 횡방향 제어기 성능 비교 분석

● swa(steering wheel angle) 비교분석





Sliding Model Control(SMC)

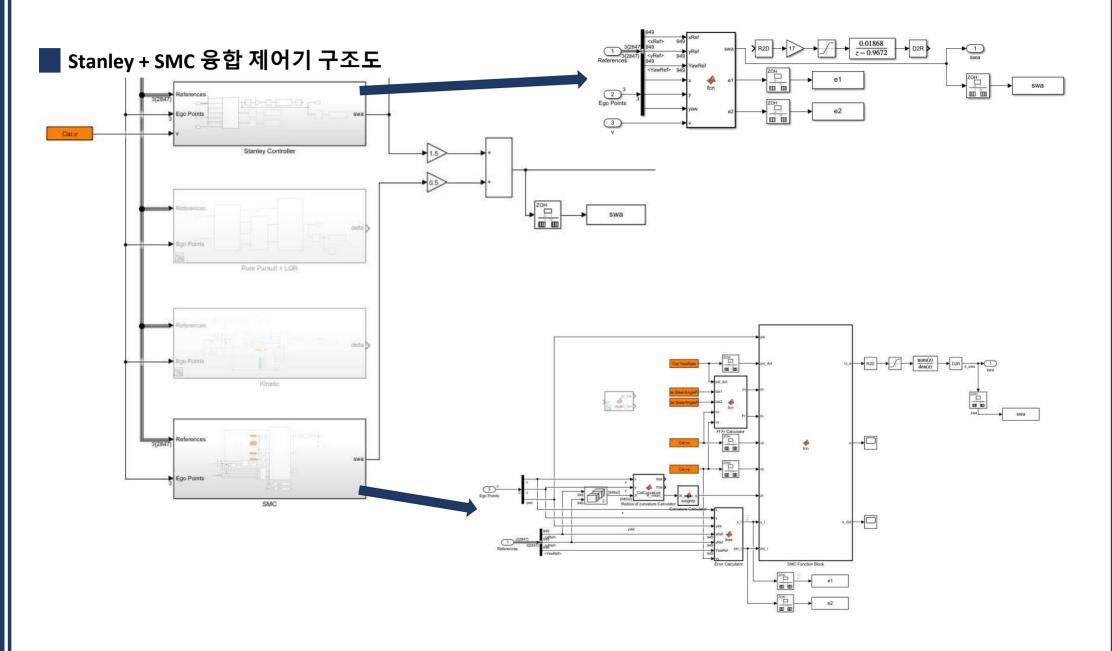
■ 횡방향 제어기 성능 비교 분석

● 횡방향 제어기 성능 비교 분석

	e1(max)	e1(mean)	e2(max)	e2(mean)	SWA(max)	SWA(mean)
SMC	0.2553	0.0791	0.0381	0.0066	9.5859	0.6006
LQR	0.4213	0.1610	0.0832	0.0089	3.1142	0.3988
Stanely	0.1728	0.0609	0.0318	0.0130	1.8982	0.3918

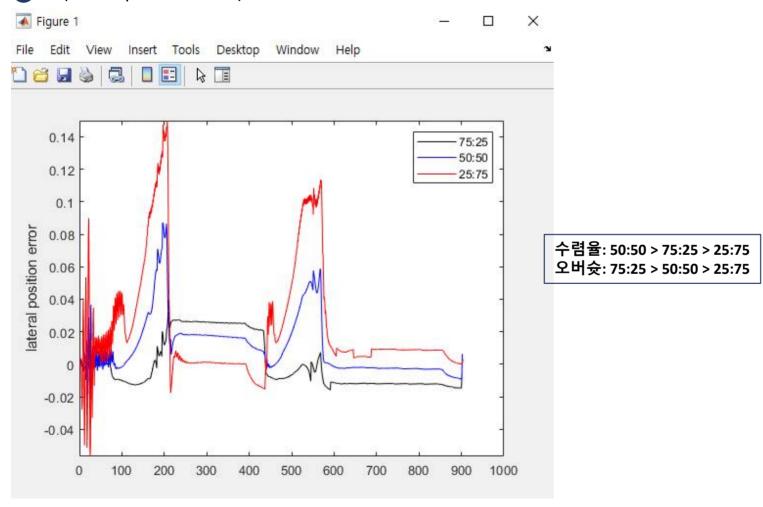
- 1. LQR은 비선형 시스템을 선형화하여 제어하기때문에 제일 성능이 낮음.
- 2. LQR은 코너링 강성이 평균값과 큰 차이를 보이는 곡선 시나리오에서 성능이 더 떨어짐.
- 3. SMC는 차량동역학 기반 비선형 강건 제어 기법이기에 LQR보다 성능이 좋음.
- 4. SMC의 직선구간 털림 현상을 해결하면 Stanley보다 e1, e2부분에서 높은 성능 예상.



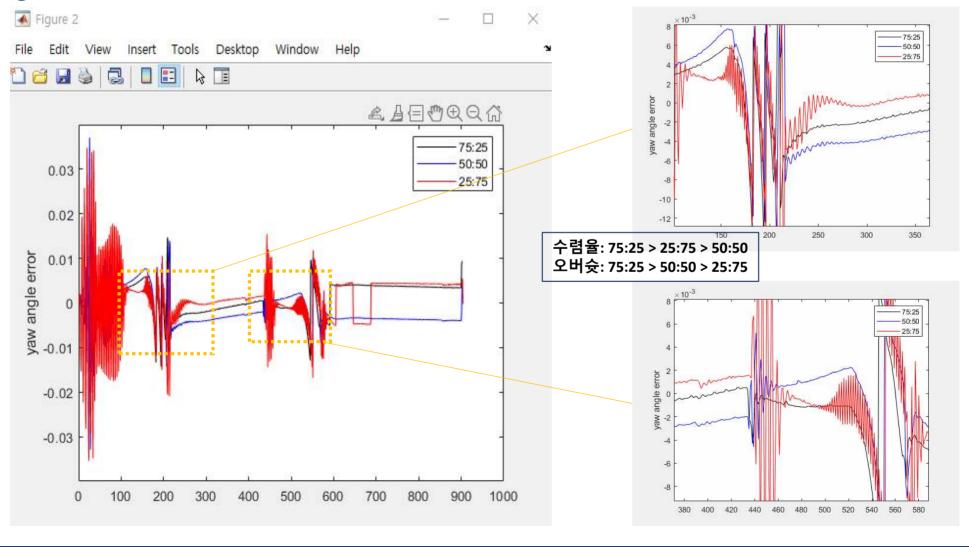




- Stanley + SMC 융합 비율에 따른 성능 비교 분석
- e1(lateral position error) 비교분석

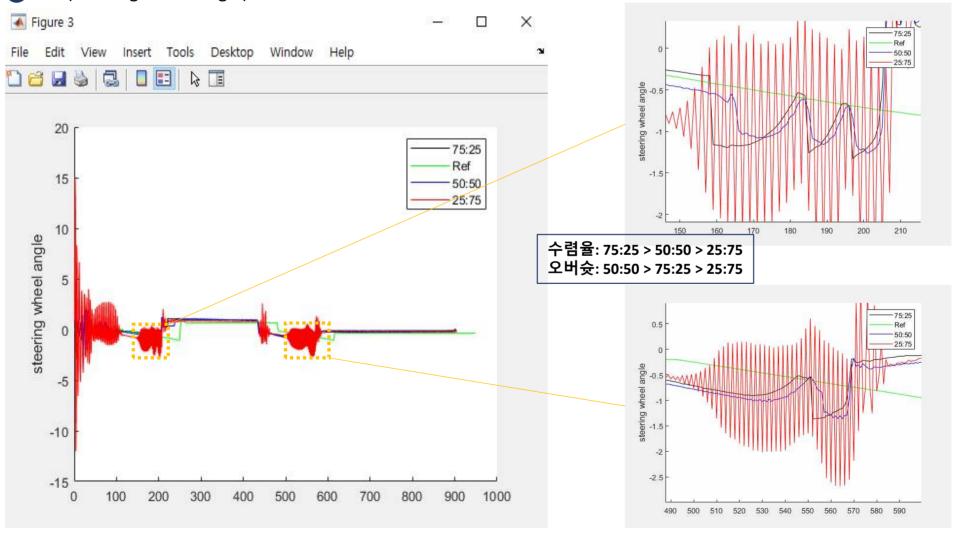


- Stanley + SMC 융합 비율에 따른 성능 비교 분석
- e2(yaw angle error) 비교분석





- Stanley + SMC 융합 비율에 따른 성능 비교 분석
- swa(steering wheel angle) 비교분석







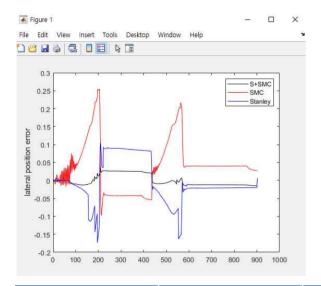
- Stanley + SMC 융합 비율에 따른 성능 비교 분석
- Stanley + SMC 융합 비율에 따른 성능 비교 분석

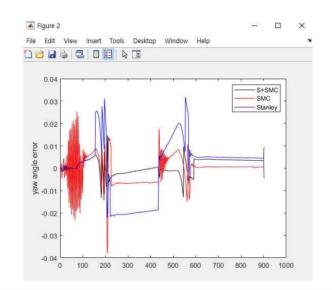
S: SMC	e1(max)	e1(mean)	e2(max)	e2(mean)	SWA(max)	SWA(mean)
75: 25	0.0395	0.0155	0.0147	0.0035	6.6176	0.5053
50: 50	0.0872	0.0209	0.0371	0.0050	10.8501	0.6231
25: 75	0.1499	0.0420	0.0354	0.0067	15.0216	1.3040

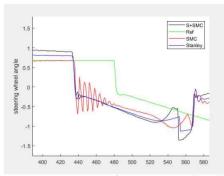


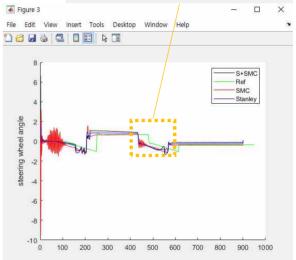
İ٦

- Stanley + SMC 및 단독 제어기 성능 비교 분석
- Stanley + SMC 및 단독 제어기 성능 비교 분석









	e1(max)	e1(mean)	e2(max)	e2(mean)	SWA(max)	SWA(mean)
S + SMC (75:25)	0.0395	0.0155	0.0147	0.0035	6.6176	0.5053
SMC	0.2553	0.0791	0.0381	0.0066	9.5859	0.6006
Stanley	0.1728	0.0609	0.0318	0.0130	1.8982	0.3918

Stanley + SMC 융합 이점

SMC

- 고차 및 준연속 기반으로써 체터링 및 외란을 효과적으로 억제.
- 비선형성으로써 코너링 강성이 급격히 변하는 곡률 구간에서 적응력 우수.
- 준연속 기반으로써 부드러운 제어 및 강건성 보장.



Stanley

- 경로 추종에서 단순하면서 효율적인 설계 및 연산 제공.
- Lateral position error, yaw angle error 직접 보정함으로써 추종 성능 우수.



Stanley + SMC

- 비선형 동역학을 처리하면서도 안정적인 경로 추종 가능.
- 곡률 및 외란이 큰 환경에서도 안정적이고 강건한 제어 가능.
- HOSMC의 고차 연산, Stanley의 실시간성 연산 융합 이점.





Sliding Model Control(SMC)

향후 계획

- HOSMC Ip와 같은 파라미터 설정, Oscillation, Stanley와의 융합 등의 미흡한 부분 보충.
- Super twisting sliding mode control(STSMC) 학습 및 구현.
- HOSMC, STSMC 성능 비교.
- 내년 춘계 학술대회 SMC + Stanley (+ 강화학습).

감사합니다.

국민대학교 지능형 차량 신호 처리 연구실 학부연구생 김지원

2024.11.29(금)



