

충돌 방지를 위한 오버슈트가 없는 FRACC(Full-range Adaptive Cruise Control) 시스템 설계

고 건 희¹⁾ · 최 세 범^{*1)}

한국과학기술원 기계공학과¹⁾

Design of Non-overshooting FRACC(Full-range Adaptive Cruise Control) System for Collision Avoidance

Geonhee Ko¹⁾ · Seibum B. Choi^{*1)}

¹⁾Department of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, 291 Daehak-ro Yuseong-gu, Daejeon 34141, Korea

Abstract : The field of ACC along with autonomous driving has been of interest consistently over the years. Recently, extensive research regarding FRACC(Full-range Adaptive Cruise Control) systems has been conducted, which is expected to lead autonomous driving systems to a higher level. Design of a proper FRACC system is more challenging than general ACC due to its wide operating range. Current algorithms switch between multiple controllers or apply rule-based gain scheduling to designate a vehicle’s behavior for each scenario. However, due to the complexity and heuristic design process, it lacks ride comfort and has no theoretical guarantee of collision avoidance, not to mention the high dependency of tuning which makes it difficult to reimplement. In this paper, a non-overshooting FRACC algorithm is developed using a single LQ controller with scheduled gain. Pole position based gain scheduling provides non-overshooting characteristics, which ensures collision avoidance while providing maximum ride comfort. The proposed algorithm was tested using MATLAB simulation.

Key words : FRACC, ADAS(첨단 운전자 보조 시스템), Non-overshooting(논-오버슈팅), Gain Scheduling(게인 스케줄링), Collision Avoidance(충돌 방지)

Nomenclature

x : ego vehicle position, m
 v : ego vehicle velocity, m/s
 x_p : preceding vehicle position, m
 v_p : preceding vehicle velocity, m/s
 t_h : time headway, sec
 q_e : error weighting factor
 q_{a_x} : acceleration weighting factor

q_j : jerk weighting factor

Subscripts

FRACC : full range adaptive cruise control
ACC : adaptive cruise control
AEB : automatic emergency braking
LQ : linear quadratic
MPC : model predictive control
TTC : time to collision

* 최세범, sbchoi@kaist.ac.kr

1. 서론

ACC(Adaptive Cruise Control)는 운전자 편의를 위해서 1900년대 말부터 꾸준히 연구되어 왔으며, 현재는 자율주행 시스템의 일부분으로서 충돌 방지 기능을 포함하면서 더욱 넓은 범위에서 작동 가능한 FRACC(Full-range Adaptive Cruise Control)에 대한 연구가 이루어지고 있다. 일반 크루즈 컨트롤이 일상 영역에서의 승차감에 초점을 두는 것에 비해 FRACC의 경우, 일반적인 주행 상황뿐만 아니라 컷인(Cut-in) 및 전방 차량의 급제동과 같은 위험 상황에서도 대응해야 한다는 점에서 제어기 설계에 어려움이 있다. 즉, 승차감 확보와 충돌 안전성 확보는 트레이드 오프 관계를 가지기 때문에 각 상황에 따라 가변적인 최적 제어를 필요로 한다.

기존의 연구들의 경우 넓은 작동 범위에 대응하기 위해 여러개의 제어기를 스위칭하는 전략을 택한다. 가장 대표적으로는 ACC 제어기와 AEB 제어기를 충돌 위험 상황에 따라 스위칭하거나⁹⁾, 주행 상황을 더욱 세부적으로 분류하여 각 상황마다 다른 제어기를 사용한다.⁸⁾ 이렇듯 여러개의 제어기를 스위칭하는 경우 승차감 저하가 발생한다. 또한, 대부분 직관 또는 경험에 기반하여 주행 상황을 분류하고 제어 전략 역시 설계되기 때문에 충돌 안전 보장을 위해서 보수적으로 게인 튜닝이 이뤄지게 되며, 최적화의 부재로 인해 승차감을 최대로 확보하지 못한다.

FRACC에서는 충돌 방지를 위해 일반적으로 AEB와의 스위칭 또는 MPC와 같은 방법을 통해 제약 조건을 활용하게 된다.¹⁾ 그러나 이는 발동 조건에 따라 충돌 안전성이 보장되지 않을 수 있다. AEB의 경우 저속에서 발동이 되지 않기 때문에 저속 구간에서 충돌 가능성이 있다. 또한, 충돌 안전이 보장된다 하더라도 게인 스케줄링에 따라 차량이 쉽게 위험상황에 진입할 가능성이 있기 때문에 위험 상황 감지 뿐만 아니라 일상 영역에서의 제어 전략도 중요하다.

본 논문에서는 오버슈트가 없는 종방향 제어기 설계를 통해 모든 작동 범위에 대한 충돌 안전성을 확보하였다. 또한, 저크를 최소화시키는 LQ 제어기

를 설계하였으며, 충돌 안전을 보장하는 최소 게인을 사용하였다. 이 최소 게인 값을 주행 상황의 변화에 따라 연속적으로 변화하도록 설계함으로써 전 주행 상황에서 승차감을 확보하였다. 해당 제어기는 일상 주행에 및 급제동과 같은 위험 상황에 대한 시뮬레이션을 통해 그 성능을 검증하였다.

2. 오버슈트가 없는 종방향 제어기 설계

제어기 설계 과정은 다음과 같다. 우선 저크를 최소화시키는 LQ 제어기를 설계한다. 이후 극점 분석을 통해 충돌안전에 대한 지표 및 이에 따른 오버슈트가 발생하지 않는 조건을 도출한다. 최종적으로 각 주행 상황에 대한 게인 맵을 구성한다.

2.1 LQ 제어기 설계

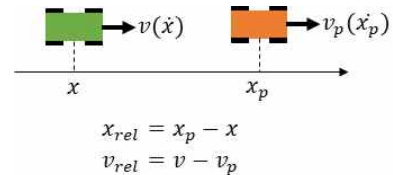


Fig. 1 차량 주행 상황

ACC의 기본 구조는 CTG(Constant Time Gap) 규칙에 따라 정의되었다. 기존 제어기들과 다르게 속도 레퍼런스를 차간 거리를 차두시간으로 나눈 값으로 설정하였다. 속도에 대한 오차, 종방향 가속도(제어 입력), 저크(승차감) 세가지에 대한 최적 제어 문제를 정의하면 아래와 같으며, 간단한 LQ 제어기를 통해 제어기를 설계할 수 있다.

$$J = \int_0^{\infty} (z^T \bar{Q} z + u^T R u) dt$$

$$z = \begin{bmatrix} e \\ \dot{x} \end{bmatrix}, e = (x_p - x)/t_h - \dot{x}$$

$$u = \ddot{x}$$

$$Q = \begin{bmatrix} q_e & 0 \\ 0 & q_{a_x} \end{bmatrix}$$

$$R = q_{J_x}$$

$$u = KX = [k_1 \ k_2] \begin{bmatrix} (x_p - x)/t_h - \dot{x} \\ \dot{x} \end{bmatrix}$$

$$= k_1 \left(\frac{x_p - x}{t_h} - \dot{x} \right) + k_2 \dot{x}$$

$$\frac{x}{x_p} = \frac{k_1/t_h}{s^3 + k_2 s^2 + k_1 s + k_1/t_h} \quad (1)$$

해당 제어기는 각 최적화 변수에 대한 가중치와 차두시간 값을 통해 튜닝 가능하다. 본 논문에서는 차두시간 값을 비롯한 가속도 및 저크에 대한 가중치는 일정하게 설정하였으며, 추종 오차에 대한 가중치만을 튜닝하여 제어기를 설계하였다.

2.2 Non-overshooting 조건

제안하는 제어기의 경우 두가지 주행 상황에 따라 다른 제어 전략을 선택한다. 우선 차간거리가 안전거리보다 긴 경우, 차량은 차간거리가 안전거리보다 작아지지 않도록 오버슈트를 제한한다. 만일 cut-in과 같은 긴급 상황의 발생으로 인해 차간거리가 안전거리 이하로 감소하면, 전방 차량과의 충돌 방지를 위해 차간거리가 0보다 작아지지 않도록 오버슈트를 제한한다.

위에서 도출한 것과 같이 승차감을 확보하는 제어기는 3차 시스템의 형태를 가지게 된다. 따라서 극점을 분석하기 어려운 3차 시스템을 그대로 사용하기 보다는 이를 2차 시스템으로 근사하여 2차 시스템의 극점 분석을 통해 오버슈트 조건을 구하였다. 2차 제어기의 형태는 아래와 같다.

$$\frac{x}{x_p} = \frac{k_1/t_h}{s^2 + k_1s + k_1/t_h} \quad (2)$$

이는 간단하게 속도 오차에 대한 P 제어와 같다. 해당 시스템의 오버슈트에 대한 경계 조건을 구하기 위해 시간 도메인에서 분석하였다. 오버슈트 기준 지점과의 거리의 최소값 도출을 통해 간단하게 각 극점에 대한 조건을 찾을 수 있다.

$$x = c_1e^{p_1t} + c_2e^{p_2t} + \dot{x}_p t + x_{rel}(0) - t_h \dot{x}_p$$

$$\begin{aligned} x(0) &= 0 & x_p(0) &= x_{p0} \\ \dot{x}(0) &= \dot{x}_0 & \dot{x}_p(0) &= \dot{x}_{p0}(const) \end{aligned} \quad (3)$$

두가지 주행 상황에 대한 오버슈트 경계 조건은 다음과 같다. 수식에서 알 수 있듯이 시스템이 임계 감쇠만으로는 오버슈트를 방지할 수 없으며, TTC 역수에 따라 최소 극점의 크기가 결정된다. 이 과정에서 TTC 역수가 자연스럽게 차량 충돌 위험도에 대한 지표로서 사용된다.

$$\min(p_1, p_2) < -\frac{V_{rel}}{X_{rel}} \quad X_{rel} = \begin{cases} x_{rel} - t_h \dot{x}_p & (x_{rel} > t_h \dot{x}_p) \\ x_{rel} & (x_{rel} < t_h \dot{x}_p) \end{cases} \quad (4)$$

제안하는 3차 제어기의 극점을 오차에 대한 가중

치에 따라 구하면 아래 그래프와 같다. 그래프에서 볼 수 있듯이 하나의 실수 극점은 가중치가 높아짐에 따라 차두시간의 역수로 수렴하며, 다른 두 개의 극점은 음의 방향으로 이동한다. 따라서 두 개의 복소수 극점이 충분히 큰 경우에 대해서는 다음 식과 같이 3차 시스템을 2차 시스템으로 근사 가능하다.

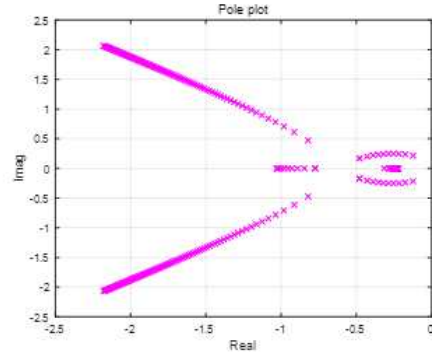


Fig. 2 극점 그래프

$$\begin{aligned} \frac{x}{x_p} &= \frac{k_1/t_h}{s^3 + k_2s^2 + k_1s + k_1/t_h} \\ &= \frac{-p_1p_2p_3}{(s - p_1)(s - p_2)(s - p_3)} \quad \text{Let } p_1 : \text{real}, p_2, p_3 : \text{complex} \\ &= \frac{-p_1}{s - p_1} + \frac{p_2p_3}{s^2 - (p_2 + p_3)s + p_2p_3} \\ &\approx \frac{-p_1}{s - p_1} + \frac{-p_2p_3}{(p_2 + p_3)s - p_2p_3} \quad \text{For large } -p_2, -p_3 \end{aligned} \quad (5)$$

이를 바탕으로 3차 시스템에 대한 오버슈트 방지 조건을 정리하면 아래와 같다.

$$\min\left(p_1, \frac{p_2p_3}{p_2 + p_3}\right) < -\frac{V_{rel}}{X_{rel}} \quad X_{rel} = \begin{cases} x_{rel} - t_h \dot{x}_p & (x_{rel} > t_h \dot{x}_p) \\ x_{rel} & (x_{rel} < t_h \dot{x}_p) \end{cases} \quad (6)$$

2.3 Gain Scheduling 전략

게인 스케줄링 전략은 다음과 같다. 위험 영역에서는 앞서 도출한 오버슈트 방지를 위한 최소 오차 가중치 값을 사용하며, 일상 주행 영역에서는 게인이 연속적으로 변화하도록 튜닝한 값을 사용한다. 앞서 구한 오버슈트 방지 조건의 경우, 주행 상황의 위험도가 증가할수록 더 정확한 값을 가지며, 안전한 주행 상황에 가까워질수록 두 복소수 극점의 크기가 작아짐에 따라 그 물리적인 의미가 없어진다. 그렇기에 아래 그래프와 같이 안전한 영역에서는 맵을 구성하는 점들을 적절히 추가하여 전체 주행 영역에 대한 게인 스케줄링을 완성하였다. 각 맵을

구성하는 점들 사이의 구간에 대해서는 선형 보간법을 이용하였다.

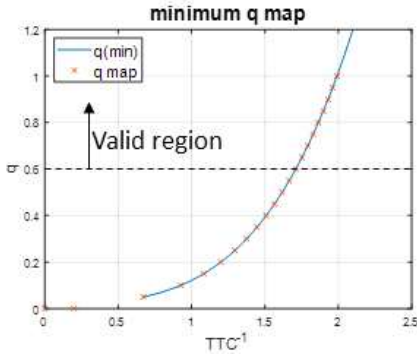


Fig. 3 오차 가중치 2차원 맵

가중치 맵을 TTC 역수가 아닌 상대거리와 상대속도에 대한 3차원 그래프로 나타내면 아래와 같다. 그래프에서 볼 수 있듯이 계인이 점차 증가하는 구간이 두 곳 존재한다. 상대거리가 0 근처인 지점에서 계인이 증가하는 이유는 전방 차량과의 충돌 방지를 위한 것이며, 안전거리 근방 지점에서의 계인 증가는 차간거리를 항상 안전거리 이상으로 유지시키기 위함이다. 아래와 같은 최소 계인 맵을 사용하면, 하나의 종방향 통합 제어기만을 통해 일상 영역에서부터 긴급제동 상황까지 광범위한 주행 상황에 대해 모두 대응 가능하다.

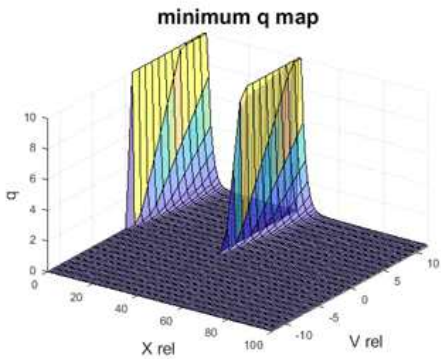


Fig. 4 오차 가중치 3차원 맵

3. 시뮬레이션

시뮬레이션은 매트랩으로 진행하였으며, 3가지 주행 상황에 대한 검증을 통해 알고리즘의 안전성과 승차감을 확인하였다.

3.1 시나리오

첫 번째 시나리오는 차량이 정차 상태에서 출발하여 전방에 있는 정차선 또는 정지된 차량에 의해 완전히 정차하는 시나리오이다. 두 번째 시나리오는 인접한 차선에서 차량이 끼어드는 상황이며, 세 번째 시나리오는 전방 차량이 급정지하는 상황이다.

3.2 시뮬레이션 결과 및 분석

3.2.1 시나리오 1

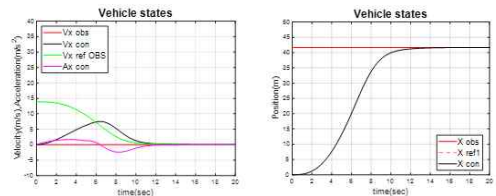


Fig. 5 제안한 가변 계인 제어 결과

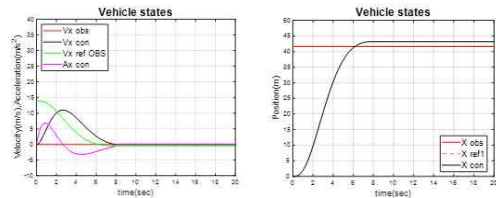


Fig. 6 상수 계인 제어 결과 (q=0.02)

제안한 가변 계인을 갖는 제어기를 사용한 경우, 그래프에서 볼 수 있듯이 안전한 가속 구간에서는 작은 계인으로 인해 완만히 가속하는 것을 알 수 있으며, 감속하는 구간에서는 계인을 적절히 키워서 오버슈트가 발생하지 않는 것을 확인할 수 있다.

그러나 비교군으로서 제공된 상수 계인 제어 결과를 살펴보면, 가속 시에는 필요이상으로 과격하게 가속을 하는 반면, 감속 구간은 충분히 대응 가능한 상황이었음에도 불구하고 작은 계인으로 인해 충돌이 발생한다. 이를 통해 주행 상황에 맞는 계인 튜닝의 필요성을 알 수 있으며, 긴급 제동과 같은 상황 뿐만 아니라 사람이 직관적으로 생각하기에 안전한 주행 상황에서도 계인을 적절히 설정하지 않으면 충돌이 일어난다는 것을 확인할 수 있다.

3.2.1 시나리오 2

Cut-in의 경우 두가지 경우에 대한 시뮬레이션을 진행하였다. 우선 첫 번째는 충돌 안전성에 큰 영향

이 없는 구간에서의 cut-in 이며, 두 번째는 cut-in으로 인해서 충돌 위험이 크게 증가하는 경우다. 우선 첫 번째 상황에 대한 시뮬레이션 결과는 아래 그래프와 같다.

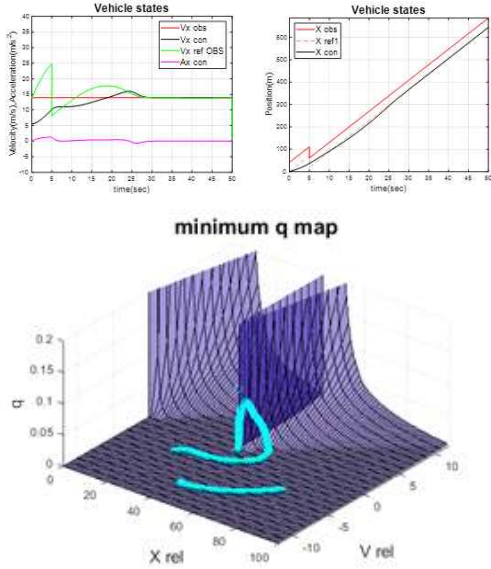


Fig. 7 안전 상황 cut-in 시뮬레이션 결과

Cut-in으로 인한 속도 레퍼런스는 급격히 변화하지만, 전방 차량이 더 빠른 안전 영역이기 때문에 종방향 가속도의 입력 변화가 크지 않은 것을 확인할 수 있다. 3차원 가중치 맵에서도 차량의 상태 변화가 가중치가 낮은 구간 내에서 이동한 것을 볼 수 있다. 이렇듯 상황에 맞는 게인 스케줄링을 통해 일상 주행 영역에서는 외부 상황 변화 및 측정 노이즈에도 둔감하게 반응하여 승차감을 최대화 확보한다.

두 번째로 주변 차량이 안전거리 이내의 위치로 cut-in하는 경우에 대한 시뮬레이션 결과는 아래와 같다. 이 경우 차량은 최대 0.5g 정도의 가속도로 상당히 과격하게 감속을 하여 cut-in 차량과의 충돌을 회피하는 것을 볼 수 있다. 앞선 첫 번째 시나리오와 비교하여 속도 레퍼런스의 변화량은 정확히 동일하지만, 가중치 맵에서도 볼 수 있듯이 차량 상태가 위험 지역으로 이동하였기 때문에 더욱 민감한 제어가 작동한 것을 알 수 있다. 이렇듯 적절한 게인 스케줄링을 통해 급격한 상황 변화에도 별도의 레퍼런스 후처리 없이 최적 제어를 수행할 수 있다.

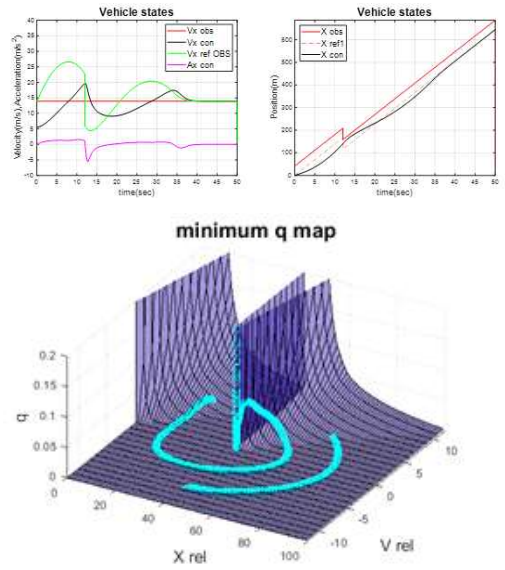
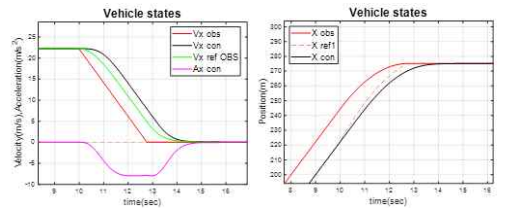


Fig. 8 위험 상황 cut-in 시뮬레이션 결과

3.2.1 시나리오 3

전방 차량이 $-8(m/s^2)$ 으로 감속하여 완전 정차하는 경우에 대한 시뮬레이션 결과는 아래 그래프와 같다. 차량은 부드럽게 감속하여 전방 차량과 동일한 가속도에 도달한 후, 다시 가속도가 증가하여 부드럽게 정차한다. 아래의 시간에 따른 가중치 변화를 살펴보면 전방 차량이 급감속하는 순간에 바로 높은 게인을 사용하는 것을 확인할 수 있다. 한가지 특이한 점은 전방 차량이 급감속하고 있는 구간보다 이후에 완전 정차했을 때 더 충돌 위험도가 높다는 것이다. 이로 인해 실제 가속도의 크기는 감소하지만 게인 값은 오히려 크게 사용하는 것을 확인할 수 있다. 그렇기에 인간의 직관과 경험에 근거하여 상황의 위험도를 분류하는 것은 빈틈이 있을 가능성이 높으며, 저속 구간에서의 충돌 안전성에도 깊은 주의를 기울여야 한다.



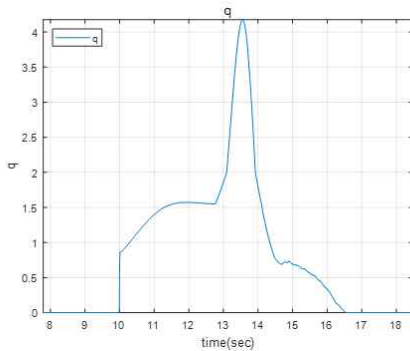


Fig. 9 전방 차량 급감속 시물레이션 결과

4. 결론

본 논문에서는 오버슈트가 없는 FRACC 알고리즘을 제안하였다. 이를 통해 넓은 작동 범위에서 충돌 안전성을 확보하였다. 또한, 저크를 최소화시키는 LQ 제어기를 사용하였으며, 안전을 보장하는 범위에서 최소 게인을 사용함으로써 승차감을 최대한으로 확보하였다. 또한, 제어기의 스위칭 없이 하나의 제어기만을 사용하여 승차감에 기여했으며, 제어기의 설계 난이도를 낮추었다. 해당 제어기의 학술적 의의는 FRACC의 전체적인 구조를 합리적으로 제안했다는 점이다. 본 논문에서는 FRACC 제어기의 핵심 구조만을 최소 게인 맵을 통해 제안하였으며, 이를 통해 FRACC가 가져야 할 필수적인 역할을 모두 수행하면서도, 다양한 일상 주행상황에 대한 세부적인 디자인 및 튜닝에 대한 자유도를 충분히 열어두고 있다.

References

- 1) Xiao, Lingyun, and Feng Gao. "A comprehensive review of the development of adaptive cruise control systems." *Vehicle system dynamics* 48.10 (2010): 1167-1192.
- 2) Shakouri, Payman, et al. "Adaptive cruise control system: comparing gain-scheduling PI and LQ controllers." *IFAC Proceedings Volumes* 44.1 (2011): 12964-12969.
- 3) Li, Shengbo, et al. "Model predictive multi-objective vehicular adaptive cruise control." *IEEE Transactions on control systems technology* 19.3 (2010): 556-566.

- 4) Moon, Seungwuk, Hyoung-Jin Kang, and Kyongsu Yi. "Multi-vehicle target selection for adaptive cruise control." *Vehicle System Dynamics* 48.11 (2010): 1325-1343.
- 5) Liang, Chi-Ying, and Hwei Peng. "Optimal adaptive cruise control with guaranteed string stability." *Vehicle system dynamics* 32.4-5 (1999): 313-330.
- 6) Kim, Sang Gyum, Masayoshi Tomizuka, and Kuo-Hsiang Cheng. "Smooth motion control of the adaptive cruise control system by a virtual lead vehicle." *International Journal of Automotive Technology* 13 (2012): 77-85.
- 7) Mullakkal-Babu, Freddy A., et al. "Design and analysis of full range adaptive cruise control with integrated collision avoidance strategy." *2016 IEEE 19th International conference on intelligent transportation systems (ITSC)*. IEEE, 2016.
- 8) Moon, Seungwuk, Ilki Moon, and Kyongsu Yi. "Design, tuning, and evaluation of a full-range adaptive cruise control system with collision avoidance." *Control Engineering Practice* 17.4 (2009): 442-455.
- 9) Lim, Wontek, et al. "Hybrid trajectory planning for autonomous driving in on-road dynamic scenarios." *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 22.1 (2019): 341-355.