

실도로 주행 데이터 기반 차선변경 주행 특성 분석

박종철* · 채흥석* · 이경수*[†]

Lane Change Driving Analysis based on Road Driving Data

Jongcherl Park*, Heungseok Chae*, Kyongsu Yi*[†]

Key Words : *Autonomous Vehicle*(자율주행 자동차), *Lane change*(차선 변경), *Driving Data*(주행 정보), *Target Vehicle*(상대 차량), *Road*(실도로), *Safety*(안전)

ABSTRACT

This paper presents an analysis on driving safety in lane change situation based on road driving data. Autonomous driving is a global trend in vehicle industry. LKAS technologies are already applied in commercial vehicle and researches about lane change maneuver have been actively studied. In autonomous vehicle, not only safety control issue but also imitating human driving maneuver is important. Driving data analysis in lane change situation has been usually dealt with ego vehicle information such as longitudinal acceleration, yaw rate, and steering angle. For this reason, developing safety index according to surrounding vehicle information based on human driving data is needed. In this research, driving data is collected from perception module using LIDAR, radar and RT-GPS sensors. By analyzing human driving pattern in lane change maneuver, safety index that considers both ego vehicle and surrounding vehicle state by using relative velocity and longitudinal clearance has been designed.

1. 서론

첨단 운전자 지원 기술인 ADAS(Advanced Driver Assistance Systems)의 발전으로 다양한 상황에서 운전자를 대신하여 컴퓨터가 주행하게 되었다. 특히 차선 이탈 방지 시스템(LDPS, Lane Departure Prevention System), 차선 유지 보조 시스템(LKAS, Lane Keeping Assistant System) 등 일정한 차선에서 주행방향을 유지할 수 있는 기술은 이미 상용차에 적용되어 사용되고 있다. 이러한 기술들의 발전으로 자율주행 자동차의 상용화도 가시화되고 있다.^{(1),(2)}

차선유지 기술에 대한 다음 단계로 차선 변경에 관련된 연구도 활발히 진행되고 있다. 안전한 차선 변경을 위

하여 전방 카메라를 이용한 차선 인식 및 레이더, 레이저 스캐너 같이 다양한 센서 데이터를 활용한 주변 차량 인지 기술 개발 중이며, 인지단계에서 얻은 정보들을 이용해 차선 변경시의 위험도 계산 및 차선 변경 결정 알고리즘 개발에 대한 연구도 이뤄지고 있다.⁽³⁾

특히 차선변경이 반드시 이뤄져야 하는 고속도로로 합류·분기점과 같은 상황에서는 안전만을 고려한 보수적인 차선 변경 알고리즘으로는 해결할 수 없는 문제가 발생한다. 합류·분기점은 합류하려는 차선의 차량 속도가 차차보다 빠른 경우가 많기 때문에 적절한 시점에 차선변경을 하지 않으면 오히려 더 큰 대형사고로 이어질 가능성이 있다. 따라서 최소한의 안전만 보장되어도 차선 변경 결정을 내릴 수 있도록 알고리즘을 설계해야 한다.^{(4),(5)}

본 연구에서는 이와 같은 알고리즘 개발을 위해서 서울 근교 고속도로에서 운전자가 주행한 데이터를 분석하여 실제 차선변경 상황에서 자차와 주변차량이 어떠한 특

* 서울대학교 차량동역학 및 제어연구실
E-mail : jongcherl@naver.com

성을 나타내는지 알아보았다. 특히 주변차량과의 차간 거리(clearance)와 상대속도를 집중적으로 분석하여 이를 기반으로 한 안전 지표를 설계하였다.

2. 사용 장비 및 알고리즘 구성

2.1. 차량 인지모듈 구성 및 센서 성능

2.1.1. 차량 인지모듈 구성

실도로 주행 데이터 수집에 사용된 차량 인지모듈은 Fig. 1과 같이 구성되어 있다. KIA K5 차량을 이용하였으며 전방에 레이더 1기, 레이저 스캐너 1기를 장착하였다. 차량 양측 후방에 각각 레이더 1기씩, 레이저 스캐너 1기씩을 장착하였으며 위치 데이터 수집을 위해 고성능 GPS 센서를 장착하였다. 차량 내부에는 오토박스가 설치되어 있으며 이를 통해 Chassis CAN 신호를 입력받는다.

2.1.2. 센서 성능

차선변경을 할 때 중요한 정보는 자차와 주변 차량과의 거리, 속도이다. 실험 차량에서는 레이더, 레이저스캐너가 이러한 데이터를 수집하고 있다. 각 센서의 감지 범위와 시야각(FOV, Field Of View)은 Fig. 2와 같다. 고성능 GPS의 경우 위성 신호와 지상의 기지국을 이용하여 지도상에서 현재 자차의 위치를 오차 0.2m 이내로 알려준다.

레이더는 도플러 효과를 이용하여 주변 차량들의 상대 위치와 상대속도를 추정한다. 레이저 스캐너는 빛이 장애물 위의 여러 점에서 반사되어 다시 센서로 들어오면 점

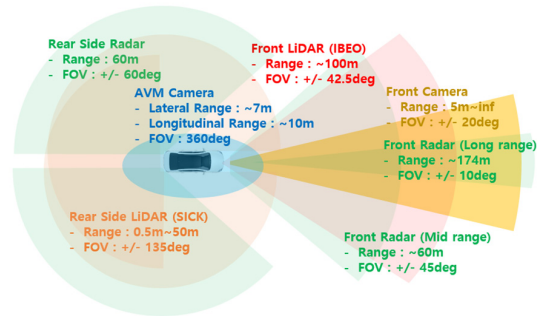


Fig. 2 Sensor detection range and fov

들의 상대위치 및 각도를 알 수 있다. 이 정보를 이용해 point cloud를 형성하여 주변 차량을 인식하며, 기본적으로 위치정보만을 입력받기에 주변차량의 속도 및 가속도는 필터링을 통한 추정치로 구하게 된다. 따라서 레이저 스캐너는 레이더에 비해 상대적으로 정확한 위치정보와 부정확한 속도 정보를 얻는다.

2.2. 주변 차량 인지 알고리즘

레이더와 레이저 스캐너는 주변에 있는 모든 장애물을 인식하여 데이터를 받기 때문에 그 중에서 차량만을 구별하여 인지할 수 있는 알고리즘이 필요하다. 레이더의 경우 차량을 속도를 가진 몇 개의 점으로 인식하기 때문에 차량의 완전한 형태를 알기는 어렵다. 레이더 기반 차량 인지 알고리즘은 크게 세 단계로 이뤄지는데 먼저 비슷한 속도와 거리 데이터를 가진 점들을 한 데 묶는(clustering) 작업을 수행한다. 이후 GPS를 활용하여 map(위치 데이터 및 차선 정보를 활용하여 각각의 cluster들을 차량으로 분류하고 형태 및 진행 방향을 결정하는 Track Management 과정을 거친다. 마지막으로 비선형 칼만 필터를 활용하여 차량의 위치 및 속도를 좀 더 정확히 추정해낸다.

레이저 스캐너의 차량 인지 알고리즘도 레이더의 그것과 거의 동일하다. 단지 레이저 스캐너는 수많은 점들의 위치정보를 알려주기 때문에 주변 차량들의 외곽선까지 식별이 가능하고, 이를 이용해 point cloud에서 차량들을 식별해 내는 Shape Extraction 단계가 clustering과 Track Management 단계 사이에 추가된다.^{(6),(7)}

3. 차선변경 인지 알고리즘

센서를 통해 인지한 자차와 주변차량의 위치와 속도

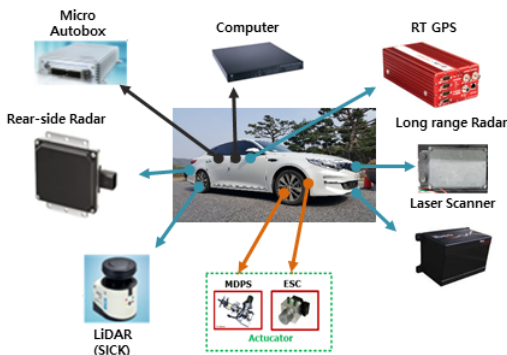


Fig. 1 Perception module configure

정보를 통해 현재 자차가 차선 위의 어느 지점에 위치하고 있으며 차선변경의 시작 시점과 종료 시점이 언제인지를 파악해야 관련 데이터를 분석할 수 있다. 즉 주행 데이터를 이용하여 차선변경을 인지할 수 있는 알고리즘이 필요하다. 이번 장에서는 요 속도 및 고성능 GPS를 이용한 위치 정보를 기반으로 차선변경을 인지하는 과정에 대해 설명할 것이다.

3.1. 차선변경 정의 및 분류

차선변경 인지 알고리즘 개발하기에 앞서 먼저 차선변경을 정확히 정의해야 할 필요성이 있다. ACSF 문서의 79항을 보면 차선변경에 대해 “타이어의 바깥쪽 모서리가 차선의 안쪽 모서리에 접촉했을 때 차선변경이 시작된다.”라고 정의하고 있다. 즉 Fig. 3과 같은 상황일 때를 차선변경 시작시점으로 정의했다.⁽⁸⁾

이러한 정의는 타당한 듯 보이지만 운전자의 차선변경 시점을 반영하지는 못한다. 타이어가 차선에 접촉할 때는 이미 운전자가 차선변경 의도를 가지고 운전대를 어느 정도 조작한 이후이기 때문이다. 본 연구에서는 차선변경 실행 여부를 결정할 때 위험도 판단을 통한 안전한 차선변경이 목적이기 때문에 운전자가 차선 변경 의도를 가진 시점을 차선 변경 시작 시점으로 설정하기로 하였다.

3.2. 요 속도 및 GPS 데이터를 이용한 차선변경 인지 알고리즘

본 연구에서 사용한 K5 차량의 인지모듈에는 카메라를 이용한 Vision 센서가 없으며 따라서 도로에서 차선을 인지할 수 있는 방법이 없다. 이를 해결하기 위해 맵 상에서 차량의 위치를 알 수 있는 정밀 GPS 데이터와 자차 Chassis에서 오는 CAN 신호를 기반으로 차선변경을 인지하는 알고리즘을 고안하였다.

앞서 논의했듯이 차선변경 시작시점을 운전자가 차선

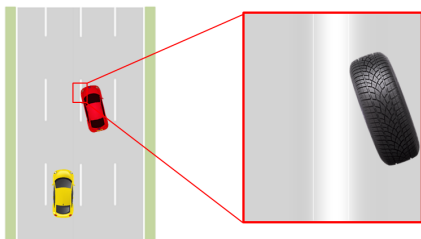


Fig. 3 Lane change manoeuvre start decision

변경 의도를 가진 시점으로 정의했다. 이 때 운전자는 방향지시등을 켜고 변경 하려는 차선 방향으로 핸들을 조작한다. 인지 모듈에서 방향지시등 데이터는 입력받지 않기 때문에 핸들 조작에 관련된 차량 요 속도 변화를 관찰하였다. 요 속도는 차선 변경 시작시점부터 종료시점까지를 그렸을 때 Fig. 4와 같이 한 주기의 사인 파 형태를 나타낸다. 따라서 요 속도 그래프에서 사인파의 시작시점과 종료시점을 각각 차선 변경 시작시점과 종료시점으로 결정하였다.^{(9),(10)}

다만 이는 문제점이 있는 데 일정한 차선 내에서 Fig. 5와 같이 횡방향 이동이 발생할 경우 차선변경 시와 동일하게 요 속도가 사인 파 형태를 나타낸다. 따라서 이를 구별해내기 위해 고성능 GPS를 통해 얻은 위치 데이터를 활용한다. GPS에서 얻은 위도와 경도 좌표를 x축, y축으로 설정하여 그래프를 그리면, 직선 주행을 할 경우 기울기가 일정하게 유지되지만 곡선주행을 하거나 차선변경을 할 경우 기울기가 변화한다. 따라서 시간에 따른 기울기 값 변화를 관찰하면 Fig. 3과 같이 차선변경 상황을 인

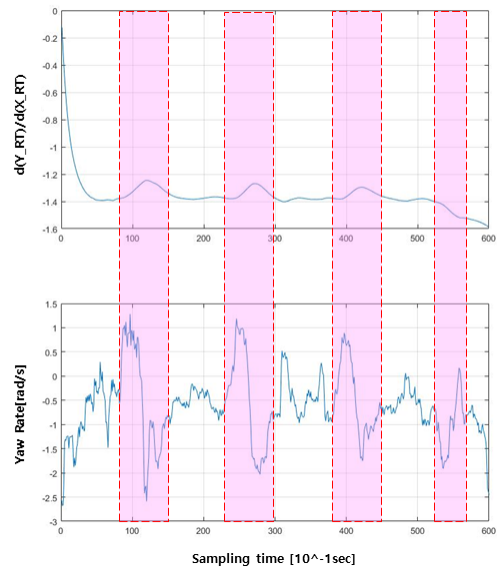


Fig. 4 Lane change detection by gps and yaw rate



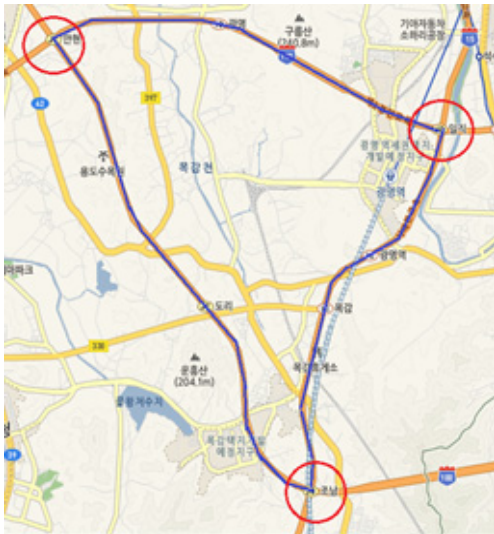
Fig. 5 Wrong lane change detection case

지할 수 있고, 이를 요 속도 그래프와 비교하여 두 조건이 모두 만족될 때를 차선변경 상황으로 인지하도록 알고리즘을 설계하였다.

4. 실도로 주행 데이터 분석

4.1. 주행 데이터 수집

주행 데이터 취득 장소는 제한속도 60km/h 이상, 110 km/h 미만의 자동차 전용 고속도로이며 Fig. 5에 구체적인 주행 경로를 표시했다. 서울근교 고속도로는 Fig. 6(a)에 나타나 있는 삼각형 구간을 반복하여 주행했고, 제2경인 고속도로의 경우 Fig. 6(b) 구간을 왕복하여 주행했다. 보수적인 데이터가 얻어지는 것을 방지하기 위해 의도적으로 속도차이가 크거나 차간거리가 작은 위험도가 큰 상황에서 차선변경을 시행했다.



(a) Ilijik-Jonam-Anhyeon junction



(b) The second Seoul-Incheon linking highway

Fig. 6 Driving Data Aquisition Route

4.2. 주변 차량의 상대위치 및 상대속도 기반 주행 데이터 분석

4.2.1. Safety Guaranteed Distance의 정의

차선변경 알고리즘 설계 시 안전만 고려해서 보수적으로 설계한다면 서론에서 언급했듯이 합류점과 같이 차선변경이 필수적으로 요구되는 상황에서 차선변경이 불가능하게 되는 문제가 발생할 수 있다. 따라서 최소한의 안전만 확보되면 차선변경 결정을 내리도록 해야 한다. 이를 위해 자차와 상대차량간의 관계를 나타내는 가장 대표적인 데이터인 자차속도, 자차와 상대차량의 상대속도를 변수로 하여 Safety Guaranteed Distance(이하 SGD)라는 안전지표를 설계하였다.

식 (1)의 SGD_{front} 은 자차량(ego vehicle)이 상대차량(target vehicle)보다 상대적으로 앞에 위치한 상황에서 차선변경을 할 때의 SGD이고, 식 (2)의 SGD_{rear} 은 자차량이 상대차량보다 뒤에 위치한 상황에서 차선변경을 할 때의 SGD이다. 자차가 상대차량보다 앞에 위치한 경우 자차가 상대차량보다 빠르다면 상대속도는 고려하지 않아도 된다. 따라서 최소한의 time gap τ_v 과 최소차간거리 C_{min} 만 고려해서 식을 설계하였다. 만약 자차가 상대차량보다 느리다면 상대속도를 고려해줘야 하고, 따라서 적절한 TTC(Time To Collision)값 $\tau_{relative}$ 를 곱해줘야 한다. 자차가 상대차량 보다 뒤에 위치한 경우도 같은 논리이다.

$$SGD_{front} = \max(v_{target} - v_{ego}) \cdot \tau_{relative,front} + v_{target} \cdot \tau_{v,front} + C_{min,front} \quad (1)$$

$$SGD_{rear} = \max(v_{ego} - v_{target}) \cdot \tau_{relative,rear} + v_{ego} \cdot \tau_{v,rear} + C_{min,rear} \quad (2)$$

SGD는 추정식이기 때문에 계수 $\tau_{relative}, \tau_v, C_{min}$ 은 취득한 차량 데이터를 통해 추정해야 한다. 다음 절에서는 차선변경 과정에서 차간거리 및 상대속도 변화를 통해 계수들을 추정할 것이다.

4.2.2. 차간거리 및 상대속도 기반 안전 영역 분석

차선변경 시작시점부터 종료시점까지 자차에 대한 상대차량의 상대속도(relative velocity)를 x축, 차간거리를 y축으로 하여 그래프를 그리면 Fig. 7~8과 같다. Fig.

7은 자차가 상대차량 뒤에 있는 경우이고 Fig. 8은 자차가 상대차량 앞에 있는 경우이다. SGD에서 상대속도가 0보다 작을 때는 최소한 소차간거리 C_{min} 만 고려해줬으므로 Fig. 7~8의 파란 색 실선이 안전한 차선변경이 이뤄

지는 영역의 경계(boundary)이다. 상대속도가 0보다 클 때는 TTC도 고려해줘야 한다. 그래프에서 TTC는 기울기를 의미하므로, 붉은색 점선이 경계를 형성한다. Fig. 9에 상대차량 위치에 따른 최소차간거리와 TTC 값을 표시하였다. 이를 종합하면 푸른색 영역은 차간거리가 SGD보다 크기 때문에 차선변경을 해도 안전하고, 붉은색 영역은 반대로 최소한의 안전거리를 만족시키지 못하기 때문에 차선변경이 위험하다.

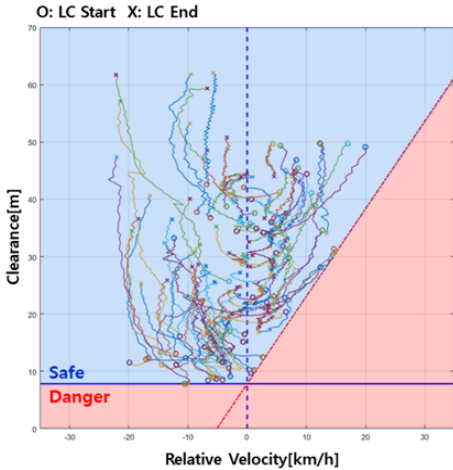


Fig. 7 Safety region plot with front SGD

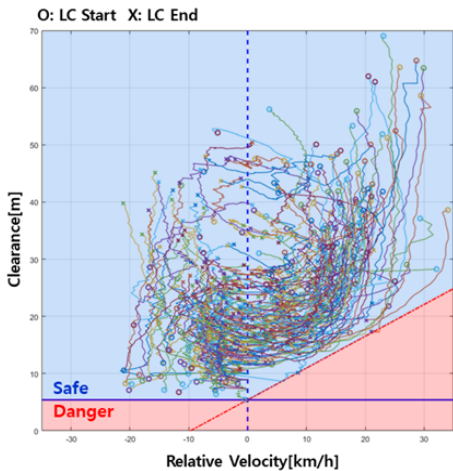


Fig. 8 Safety region plot with rear SGD

상대차량위치	전방	후방
TTC	5.5초	2초
Min. Clearance	7.8m	5.4m

Fig. 9 TTC and Minimum Clearance according to target vehicle location

4.3. 주변 차량 운전자의 반응 시간 분포

자차가 상대차량 앞으로 차선변경을 하는 경우 상대차량의 속도가 자차보다 빠르다면 상대차량 운전자가 전방에서 차선변경을 하려고 들어오는 차를 인지하는 순간 브레이크를 밟아 감속하기 시작할 것이다. 상대차량 운전자가 감속하기 전까지 두 차량 간의 차간 거리는 서로 간의 상대속도에 따라 빠르게 좁혀지기 때문에 상대차량 운전자가 반응할 때까지 걸리는 시간은 차선변경 시 고려해야 할 안전 지표이다.

Fig. 10은 차선변경 시작시점부터 상대차량이 감속을 시작한 시점까지 걸리는 시간, 즉 상대차량 운전자의 반응시간의 분포를 그린 것이다. 운전자에 따라 상이한 반응시간을 나타내지만 대부분의 반응시간이 0초에서 1.5초 사이에 분포하고 있으며 평균값은 1.12초이다.

4.4. 차선변경 종료 시점에서의 time gap

4.2절에서 분석한 상대속도와 차간거리 그래프는 SGD의 계수인 최소차간거리(minimum clearance)와 TTC의

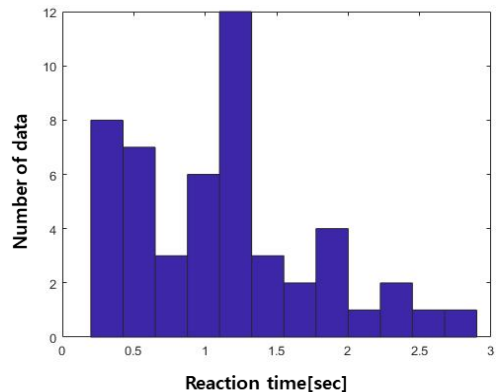


Fig. 10 Reaction time distribution of target vehicle driver

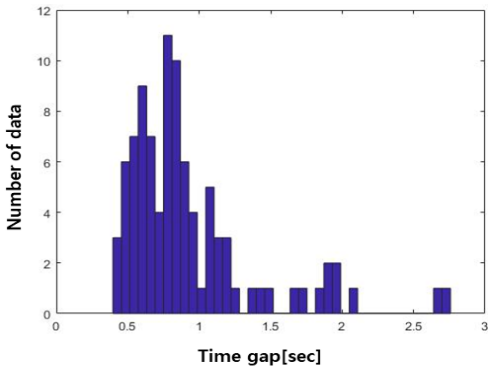


Fig. 11 Distribution of time gap at the end of lane change

경계값을 알려주지만 time gap t_v 의 값을 알려주지 못한다. 따라서 차선변경 종료 시점에서 어느 정도 time gap이 유지되는 지를 알아봐야 한다.

차선변경 종료시점은 앞서 서술했듯이 요 속도의 사인과 곡선이 끝나는 지점으로 설정하였다. 이 때 time gap의 경우 후방에 위치한 차량의 속도를 기준으로 계산한다. 분석결과 time gap의 분포는 Fig. 11과 같이 나타났다. 0.5초에서 1초 부근에 집중적으로 분포하고 있으며 최소값은 0.48초, 평균값은 0.93초이다. 따라서 차선변경 종료 시 평균적으로 0.93초 이상의 time gap을 확보해야 한다는 결론이 나온다.

5. 결론

고속도로 합류·분기점과 같이 반드시 차선변경이 필요한 환경에서 최소한의 안전성을 확보한 차선변경 알고리즘을 구현하기 위해서 Safety Guaranteed Distance라는 안전지표를 설계하였으며 실도로에서의 차량 주행 데이터를 기반으로 다양한 주행 특성을 분석하여 안전지표의 계수들을 추정하였다. 상대차량이 자차량 후방에 있을 때는 최소 TTC 4초, 최소차간거리 7m로 나타났다. 상대차량이 자차량 전방에 있을 때는 최소 TTC 2초, 최소차간거리 3.5m로 나타났다. 상대차량 운전자의 반응 시간은 평균 1.12초로 나타났으며 차선변경 종료 시점에서 유지해야하는 time gap은 0.93초로 나타났다. 본 연구결과를 통해 기존에 안전에만 초점을 두고 보수적으로 설계하였던 차선변경 알고리즘을 개선하는데 기여하였다.

후 기

본 논문은 산업통상자원부 산업기술혁신사업(10079730, 자동차전용도로/도심로 자율주행 시스템 개발 및 성능평가)의 지원을 받아 수행하였습니다.

참고문헌

- (1) Eidehall, A., Pohl, J., and Gustafsson, F., 2005, "A new approach to lane guidance systems", Intelligent Transportation Systems Conference, Vienna, Austria, pp. 108~112.
- (2) Minoiu, N., Mammar, S., Glaser, S., and Lusetti, B., 2010, "Driver assistance system for lane departure avoidance by steering and differential braking", in 6th IFAC Symposium Advances in Automotive Control, Munich, Germany, July. 12~14, pp. 471~476.
- (3) 채홍석, 임형호, 홍윤석, 이경수, 2017, "실 도로 주행 상황을 반영한 최소 안전 거리 기반 자율주행 차선 변경 알고리즘 개발", 대한기계학회 IT융합부문 2017년도 춘계기술대회, 2017.5, 133~134.
- (4) Lu, Xiao-Yun, et al., 2004, "Automated vehicle merging maneuver implementation for AHS." Vehicle System Dynamics 41.2, pp. 85~107.
- (5) Kachroo, Pushkin, and Zhijun Li., 1997, "Vehicle merging control design for an automated highway system." Intelligent Transportation System, 1997. ITSC'97., IEEE Conference on. IEEE.
- (6) Kim, B. and. Yi, K., 2013, "Probabilistic states prediction algorithm using multi-sensor fusion and application to Smart Cruise Control systems", IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Gold Coast, Australia, pp. 888~895.
- (7) Kim, B. and. Yi, K., 2014, "Probabilistic and Holistic Prediction of Vehicle States Using Sensor Fusion for Application to Integrated Vehicle Safety Systems", IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol. 15, No. 5, pp. 2178~2190.
- (8) IWG, 2017, "Proposal for amendments to Regulation No. 79 (steering equipment) Requirements applicable to ACSF of Category C1", GRRF-84-02 84th GRRF, 19~22, Agenda item 9(b).

- (9) Miller, R. J. and Srinivasan, G., 2005, "Determination of Lane Change Maneuvers Using Naturalistic Driving Data", 19th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV), Washington, D.C., No. 05-0337.
- (10) Zheng, Y. and Hansen, J. H. L., 2017, "Lane-Change Detection From Steering Signal Using Spectral Segmentation and Learning-Based Classification", IEEE Transactions on intelligent vehicles, Vol. 2, No. 1.