

# 고속도로에서의 자율주행 알고리즘 개발 및 평가를 위한 다차량 시뮬레이션 환경 개발

이호준\* · 정용환\* · 민경찬\*\* · 이명수\*\* · 신재곤\*\* · 이경수\*

## Multi-Vehicle Environment Simulation Tool to Develop and Evaluate Automated Driving Systems in Motorway

Hojoon Lee\*, Yonghwan Jeong\*, Kyongchan Min\*\*, Myungsu Lee\*\*,  
Jae Kon Shin\*\*, Kyongsu Yi\*

*Key Words* : Simulation Environment(시뮬레이션 환경), Automated Driving Systems Evaluation(자율주행시스템 평가),  
Virtual Sensor(가상 센서)

### ABSTRACT

Since real road experiments have many restrictions, a multi-vehicle traffic simulator can be an effective tool to develop and evaluate fully automated driving systems. This paper presents multi-vehicle environment simulation tool to develop and evaluate motorway automated driving systems. The proposed simulation tool consists of following two main parts: surrounding vehicle model and environment sensor model. The surrounding vehicle model is designed to quickly generate rational complex traffic situations of motorway. The environment sensor model depicts uncertainty of environment sensor. As a result, various traffic situations with uncertainty of environment sensor can be proposed by the multi-vehicle environment simulation tool. An application to automated driving system has been conducted. A lane changing algorithm is evaluated by performance indexes from the multi-vehicle environment simulation tool.

### 1. 서론

최근 고령운전자의 증가와 구글의 자율주행자동차 시험 주행, 자동차 제작 기술의 향상으로 인해 자율주행자동차에 대한 관심이 증대되고 있다.<sup>(1)</sup> 그 중 주행 조향 보조 시스템(LKAS), 자동 비상 제동 장치(AEB) 등 자율주행기술의 기초가 되는 일부 기술들은 능동안전시스템(ADAS)으로서 이미 상용화되고 있다. 또한 자동차 및 자동차부품의 성능과 기준에 관한 규칙 제 15조의 2에 따라 자동차안전정성제어장치(ESC) 및 타이어공기압 경고

장치(TPMS) 등의 능동안전시스템 중 일부는 2012년 이후 생산 차량과 그 장착이 의무화 되었다. 이와 같이 능동 안전시스템이 일반화 됨에 따라서 단순히 운전자를 보조하는 수준 이상의 자율주행시스템에 대한 연구가 여러 분야에서 이루어지고 있다.<sup>(2)</sup>

자율주행시스템이 고도화됨에 따라 자율주행차량이 처리해야할 주변 환경의 시나리오들은 더욱 다양해졌으며, 이러한 상황에 대처하기 위해 자율주행시스템은 더욱 복잡해 졌다.<sup>(3)</sup> 자율주행시스템을 개발하는 과정에서 시스템에 대한 적절한 평가는 필수적이다.<sup>(4)</sup> 하지만 자율주행시스템 평가를 위해 사용되는 시나리오 기반의 시뮬레이션은 고도화되는 자율주행시스템을 평가하기에 적절하지 않으며,<sup>(5,6)</sup> 실험 차량을 이용한 일반도로주행 평가

\* 서울대학교 기계항공공학부

\*\* 한국교통안전공단

E-mail : whiteout92@snu.ac.kr

역시 의미 있는 상황을 접하기 위해선 너무 많은 시간이 걸리는 등 다양한 문제점을 내포하고 있다.<sup>(7,8)</sup>

본 연구에서는 이 같은 문제를 해결하기 위해서 고속도로 환경을 묘사할 수 있는 시뮬레이션 환경을 구축하였으며, 이 시뮬레이션 환경을 이용하여 고속도로에서 실제로 일어날 수 있는 상황들을 랜덤하게 발생시켰다. 이렇게 랜덤하게 발생시킨 다양한 상황 내에서 차선변경알고리즘의 성능을 통계적으로 평가하였다.

## 2. 다차량 시뮬레이션 환경 개요

다차량 시뮬레이션 환경은 고속도로 상황에서의 주변 차량의 거동과 주변 환경 인지 센서, 차량의 동역학적 거동을 묘사한다. 다차량 시뮬레이션 환경은 주변 차량 모델과 자차량(자율주행시스템이 장착된 차량)의 센서 모델, 차량 모델로 구성되어 있다. 주변 차량 모델은 운전자 모델과 간단한 차량 모델로 구성되어 있어서 각 차량이 독립적으로 주변 상황을 판단하여 거동하며, 그 결과 고속도로 환경을 잘 묘사할 수 있다. 또한 각 차량이 독립적으로 판단하여 거동하기 때문에 임의적으로 다양한 상황이 생성된다.

자차량의 센서 모델은 양산 차량에서 현실적으로 사용할 수 있는 수준을 고려하여 카메라 센서와 레이더 센서 모델로 구성되어 있다. 카메라 센서 모델은 가상의 차선을 인지하여 적절한 노이즈와 함께 자율주행시스템에 전달한다. 레이더 센서는 주변 차량들의 위치 및 거동을 인지하여 자차량에 대한 상대 위치와 상대속도를 적절한 노이즈와 함께 자율주행시스템으로 전달한다.<sup>(9)</sup> 인지 센서

모델은 적은 계산량으로 현실성 있는 결과를 얻을 수 있는 확률적 모델을 이용하였다.<sup>(10)</sup> 자차량의 차량모델은 시뮬레이션의 현실성을 위해서 매우 중요하며, 본 연구에서는 상용프로그램인 CarSim을 사용하였다. Fig. 1에 다차량 시뮬레이션 환경의 개요가 묘사되어 있으며 다차량 시뮬레이션 환경은 MATLAB/Simulink 환경에서 구축되었다.

## 3. 주변 차량 모델

합리적인 시뮬레이션 데이터를 얻기 위해서 주변 차량 모델은 현실적인 거동을 보여야 하며 계산 시간이 적어야 한다 이 목적을 이루기 위해 주변 차량 모델은 현재 상태 정보만을 이용해 다음 스텝의 입력을 결정하는 결정론적 운전자 모델과 기구학적 요소만 고려한 차량 모델(Kinematic model)로 구성되어 있다. 이렇게 구성된 주변 차량 모델은 목표 속도에 맞춰서 차선을 따라 주행 할 수 있고, 선행 차량이 존재하면 선행 차량과 안전거리를 유지하며 주행하며, 필요한 경우 차선을 변경할 수 있다. 예를 들어 목표 속도보다 느리게 주행하는 선행 차량이 존재할 경우 3~10초(각각의 주변 차량에 따라 다름) 간 안전거리를 유지하며 주행한다. 그 후 차선변경을 시도하며, 차선 변경이 가능하다 판단이 되면 차선을 변경하여 목표 속도에 맞춰 주행한다. 또한 적은 주변 차량으로 지속적이고 다양한 환경을 만들어 주기 위해서 각각의 주변 차량이 자율주행시스템이 구성된 차량에서 일정거리 이상 멀어지면 다시 자차량 주변으로 위치를 변경 시키며, 동시에 그 주변 차량의 목표 속도를 재설정한다. 이러한 방법이 이

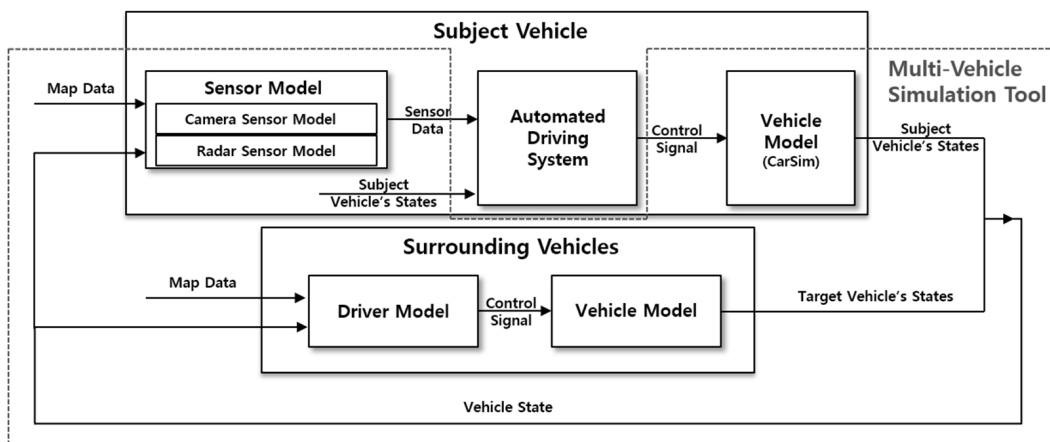


Fig. 1 Configuration of multi-vehicle simulation tool

용하여 다양하고 복잡한 시뮬레이션 환경을 빠르게 얻을 수 있다.<sup>(11)</sup>

### 3.1. 주변 차량 운전자 모델

Fig. 2에 나타난 것과 같이 운전자 모델은 상위 제어기와 하위 제어기로 구성되어 있다. 상위 제어기는 목표 차선에 대한 종방향 에러와 요각을 차선 정보와 차량 정보를 이용해서 도출하며, 선행 차량을 판별하여 선행 차량이 존재한다면 선행 차량의 상태를, 아니라면 랜덤하게 정해진 목표 속도를 하위 제어기로 전달한다. 주변 차량의 운전자 모델은 시뮬레이션 상에 존재하는 모든 차량의 상태를 알 수 있다고 가정하였다. 이러한 가정이 가능한

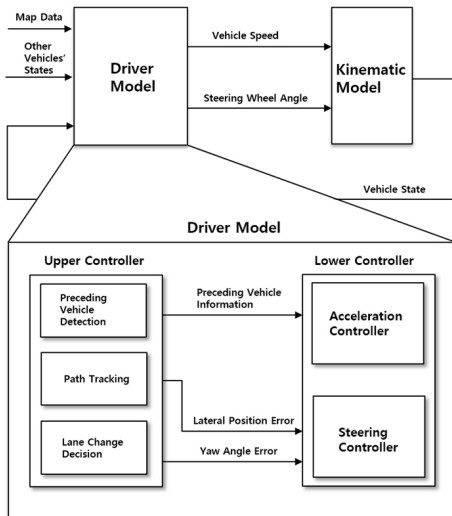


Fig. 2 Surrounding vehicle configuration

이유는 이 다차량 시뮬레이션 환경을 통해서 관심이 있는 것은 주변 차량의 오류로 인한 사고나 성능 지표들이 아니기 때문이다.

$$a = k_1(C_s - C_{des}) + k_2(V_{\leq ad} - V_s) \quad (1)$$

$$\delta_f = k_4 \cdot h_{err} + k_5 \cdot y_{err} + k_6 \cdot \int y_{err} dt \quad (2)$$

$C_{des} = C_o + T_{gap} V_s$   
 $C_o = \text{Min Clearance}$        $T_{gap} = \text{Time Gap}$   
 $V_s = \text{Subject Vehicle Speed}$        $V_{des} = \text{Desired Speed}$   
 $V_{Lead} = \text{Preceding Vehicle Speed}$

하위 제어기는 상위 제어기에서 도출한 값들을 이용하여 가속도와 조향각을 식 (1)과 (2)를 통해 제어한다. 이때 각 제어기의 PI 계인들은 문승욱<sup>(12)</sup>의 연구 결과를 이용하여 결정하였다. 가속도와 조향각은 각각  $\pm 3\text{m/s}^2$ ,  $\pm 15^\circ$ 로 크기를 제한하였으며 변화량 한계를 통해 변화량을 제한하였다.

### 3.2. 주변 차량 상태 재설정

유효한 상황을 빠르게 발생시키고 계산량을 줄여 시뮬레이션을 더 효율적으로 만들기 위하여 주변 차량이 자율주행시스템이 탑재된 차량에서 일정 거리 이상 멀어지면 다시 자차량 주변으로 이동시키고 목표 속도를 랜덤으로 다시 설정하도록 구성하였다. Fig. 3을 통해 자차량 주변에 주변 차량이 존재할 수 있는 한계와 그 한계를 넘었을 때 이동되는 영역을 나타냈다. 이 한계와 영역은 자차량 위치에 대해 상대적으로 결정된다. 만약 주변 차량이 한

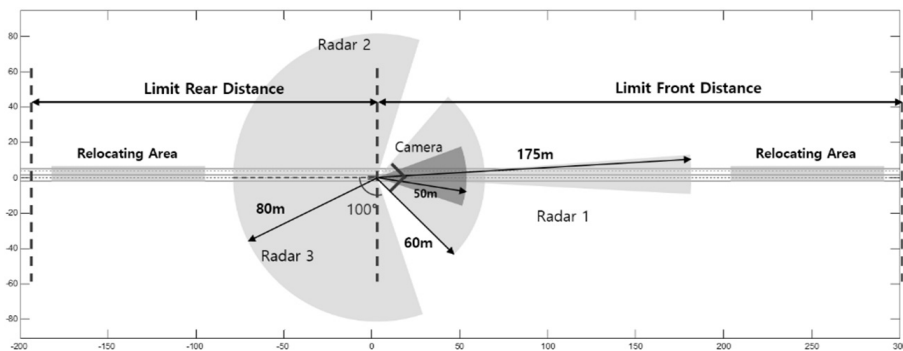


Fig. 3 Area of relocating surrounding vehicles

계 이상으로 멀어지면 우선 그 차량의 목표 속도를 정해진 범위 안에서 임의로 추출하며 그 속도가 자차량의 속도보다 빠르면 뒤쪽 영역 중 임의의 한 점으로 이동시키며, 자차량 속도보다 느릴 경우 앞쪽 영역으로 이동시킨다. 이 영역은 Fig. 3에 표현된 바와 같이 자차량 센서 감지 범위 밖에 위치하기 때문에 자차량 입장에서 비현실적인 상황은 발생하지 않는다.

#### 4. 자차량 모델

자차량 모델은 동역학적 차량 모델과 인지 센서 모델로 이루어져 있다. 차량 모델을 앞서 밝혔듯이 CarSim 프로그램에 이용하였다. 자차량의 인지 센서는 실제 차량에서 사용될 수 있는 수준인 3개의 레이더와 1개의 카메라로 구성됐다. 레이더의 감지 범위와 오차율은 Delphi 사의 모델을 통해 정했고, 카메라의 감지 범위 및 오차율은 Mobileye 사의 모델을 기준으로 정했다. 각각의 센서 모델은 시뮬레이션의 현실성을 높이면서 계산량을 줄이기 위하여 확률론적 모델을 이용하였다.<sup>(10)</sup>

각 센서 모델의 감지 범위와 구조가 Fig. 4에 나타나 있다. 카메라 센서 모델은 자차량의 상태와 차선 정보를 이용하여 자차량에 대한 차선의 상대적 위치와 곡률 정보를 노이즈와 함께 자율주행시스템으로 전달한다. 레이더 센서 모델은 자차량의 상태와 주변 차량의 상태를 이용하여 자율주행시스템으로 주변 차량의 상대적인 위치와 상대속도를 노이즈와 함께 전달한다.

이렇게 실제 상용화가 가능한 수준의 인지 센서의 특성을 반영한 시뮬레이션 환경을 구축함으로써 자율주행

시스템의 성능을 더욱 현실적으로 평가할 수 있다. 또한 실제 도로에서의 실험에서 발생 할 수 있는 문제들을 시뮬레이션을 통해 미리 확인 할 수 있다.

#### 5. 다차량 시뮬레이션 환경을 통한 차선변경 알고리즘 평가

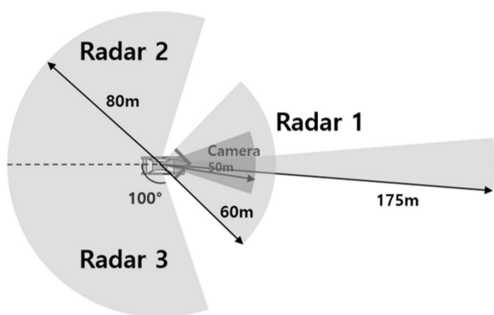
이번 장에서는 본 연구에서 개발한 다차량 시뮬레이션 환경을 통해 어떤 방식으로 자율주행시스템을 평가할 수 있는지 설명할 것이다.

##### 5.1. 성능 지수 정의

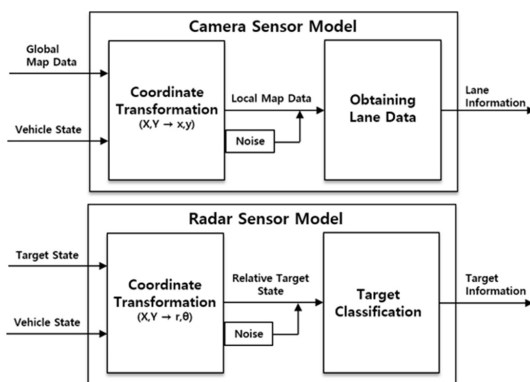
시나리오를 통한 평가와 달리 다차량 시뮬레이션 환경을 통한 평가에서는 다양한 주행 상황이 임의적으로 생성되기 때문에 평가할 대상의 성능을 잘 나타낼 수 있는 성능 지수를 정의하고 그 값의 분포를 통해 대상 시스템의 성능을 평가한다.

이번 장에서 평가할 시스템은 차선변경 알고리즘이므로 안전도 관점에서의 성능 지표 3개와 탑승자의 편안함 관점에서 2개의 성능 지표 2개를 정의하였으며 각각의 지표들은 차선 변경 중에만 산출되었다. 각 지표들의 정의는 Table 1과 Fig. 5에 나타내었다.

안전도 측면에서 성능 지수는 최소 거리(Min Distace), 최소 간극(Min Clearance), 최소 충돌 시간(Min TTC)으로 정의했다. 최소 거리는 자차량 주변 차량 중 가장 가까운 차량과의 거리를 의미하며, 최소 간극은 자차량 무게 중심부터 주변차량의 무게중심까지의 차선의 수직한 방



(a) Sensing range of sensor models



(b) Configuration of sensor models

Fig. 4 Sensing range and configuration of surround recognition sensor models

Table 1 Definition of performance indexes to evaluate lane change algorithm

	Performance Index
Safety	$Min\ Distance$ $Min\ Clearance \begin{cases} Front\ Min\ Clearance \\ Rear\ Min\ Clearance \end{cases}$ $Min\ TTC \begin{cases} Front\ Min\ TTC = \frac{Front\ Min\ Clearance_x}{v_{sub} - v_{front}} \\ Rear\ Min\ TTC = \frac{Rear\ Min\ Clearance_x}{v_{rear} - v_{sub}} \end{cases}$
Comfort	$a_x \quad a_y$

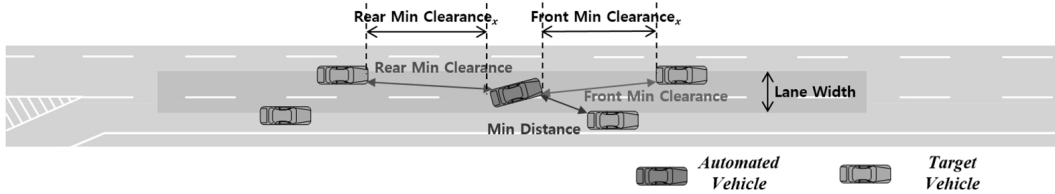


Fig. 5 Performance indexes to evaluate lane change algorithm

향 거리 차이가 차선 폭의 절반 이하인 차량 중에 전후방으로 가장 가까운 차량까지의 거리로 정의된다. 이때 최소 간극은 자차량의 전방과 후방으로 2개의 값을 얻을 수 있는데, 이 두 값 모드를 최소 간극으로 한다. 최소 간극을 전후방 상대속도로 각각 나눈 값을 최소 충돌 시간으로 정의한다. 이때 충돌 시간이 양수 일 때 의미 있는 값을 갖을 수 있도록 상대속도는 항상 후방차량의 속도에서 전방차량의 속도를 뺀 값으로 했다.

## 5.2. 시뮬레이션 결과

본 연구에서 개발한 다차량 시뮬레이션 환경에서 차선 변경 알고리즘이 포함된 자율주행시스템이 목표 속도 80

kph로 약 138km를 주행하였으며, 131회 차선변경 하였다. 도로는 2차선 직선 형상이었으며, 주변 차량은 7대였다. 7대의 주변 차량 중 5대의 목표 속도는 80~120kph 범위에서 3~7초 주기로 임의로 결정되었으며, 2대의 차량은 각 차선에 1대씩 배치되어 50~60kph 범위의 속도로 주행하여 자차량의 차선 변경이 최대한 자주 일어나도록 유도하였다.

Fig. 6에 나타난 것은 자차량이 차선변경하는 동안 주변 차량 중 20m 내에 존재하는 주변 차량의 궤적을 누적한 것이다. 차선 변경 알고리즘이 임의적으로 생성되는 복잡한 차량 환경에 대해서 하얀색 부분만큼의 안전 영역을 보장하는 것을 확인 할 수 있다. 안전 영역의 크기와 형상을 통해 차선 변경 알고리즘의 안전 성능을 평가할

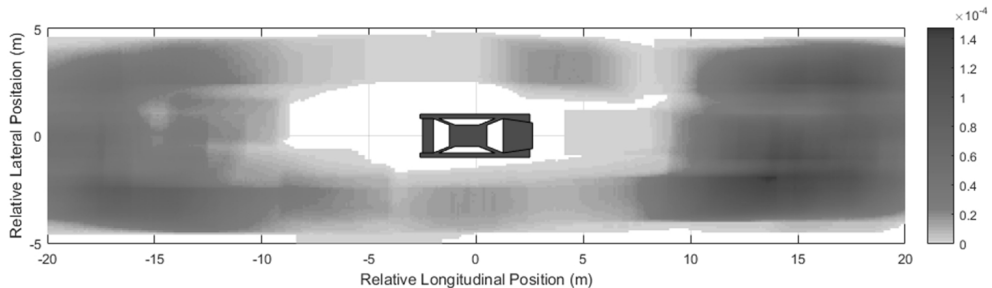
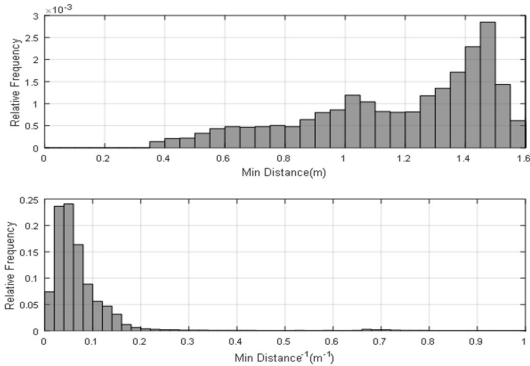


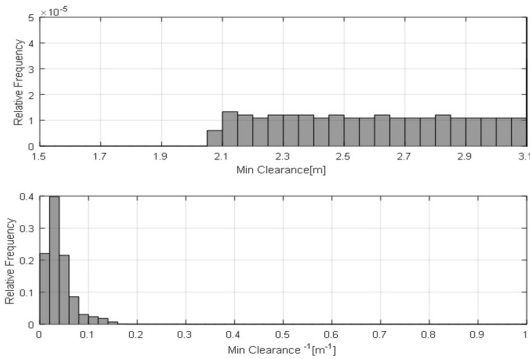
Fig. 6 Distribution of relative position of surrounding vehicles as lane change

수 있다.

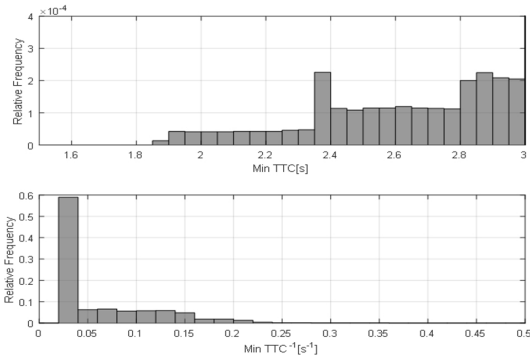
차선 변경 시에 측정된 각 지수들의 위험영역에서의 분포와 최소값, 역수의 분포를 통해서 차선변경 알고리즘의 성능을 평가 할 수 있다. Fig. 7은 안전과 관련된 성능 지수들의 분포를 나타낸다. 각 그래프의 첫 번째 그래프는 위험영역에서 각 지수들의 분포를 나타내며 두 번째



(a) Distribution of Min Distance and Inverse Min Distance



(b) Distribution of Min Clearance and Inverse Min Clearance



(c) Distribution of Min TTC and Inverse Min TTC

Fig. 7 Distribution of performance index for safety

그래프는 각 지수의 역수의 분포로서 측정된 성능 지수의 전체 분포를 보여준다. (a)는 최소 거리의 분포를 나타낸다. 첫 번째 그래프를 통해 이 차선 변경 알고리즘은 차선 변경 중에 어떤 상황에서도 다른 차량과의 거리를 38cm 이상 유지하는 것을 알 수 있다. 두 번째 그래프를 통해 차선 변경 시 위 그래프에 표현된 위험상황들이 얼마나 드물게 일어나는 지 알 수 있다. (b)는 앞, 뒤 차량과의 간극을 나타낸다. 첫 번째 그래프를 통해 차선변경 시 항상 1.95m 이상을 유지 하는 것을 볼 수 있으며, 차량 간격이 3m 이하인 위험한 상황이 전체 차선변경 상황 중 얼마나 드물게 일어나는 지를 두 번째 그래프를 통해 확인 할 수 있다. (c)를 통해서 이 알고리즘은 차선변경 시 최소 1.8 s 이상의 충돌시간(TTC)을 유지하는 것을 확인 할 수 있다. 충돌시간의 역수의 분포에서 첫 번째 급간에 해당되는 값이 존재하지 않고 두 번째 급간에 값이 편중되어 있는 것을 볼 수 있는데 이러한 이유는 시뮬레이션 상에서 충돌시간을 측정 할 때, 그 값이 30 s 이상이거나 음수일 경우 충분히 안전하다고 판단하여 값을 30 s로 고정하여서 생긴 현상이다.

중방향 및 횡방향 가속도의 분포를 통해 해당 알고리즘의 편안함을 평가 할 수 있다. Fig. 8은 차선변경 시 차 차량이 사용한 중방향 및 횡방향 가속도의 분포를 나타낸 것이다. 차선변경이 감속하면서 이루어지기 보단 가속하면서 이루어 지는 것을 알 수 있으며, 횡방향 가속도의 경우 주로  $\pm 1\%$  이하의 값이 이용되는 것을 볼 수 있다.

## 6. 결론

본 연구에서는 자율주행시스템의 고속도로 상황에 대한 성능 평가를 위해 다차량 시뮬레이션 환경을 개발하였다. 주변 차량들의 거동은 실제 운전자의 특성을 반영함

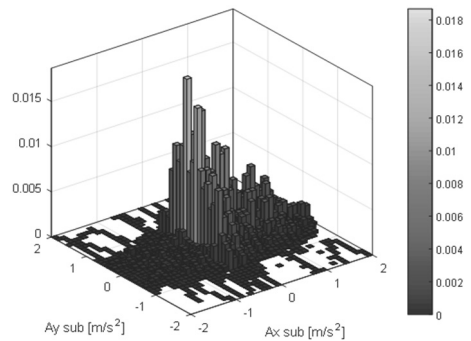


Fig. 8 Distribution of lateral and longitudinal acceleration

과 동시에 다양한 주행 상황을 재현하는 것이 가능하다. 자동차 센서 모델을 통해 센서의 불확실성을 고려하였다. 또한 개발된 시뮬레이션 환경을 이용해 다양한 성능지수들을 이용하여 차선변경알고리즘에 대한 평가가 이루어졌으며, 이를 통해 다차량 시뮬레이션 환경이 어떻게 자율주행시스템의 개발 및 평가에 이용될 수 있는지 보였다. 본 연구에서 개발한 다차량 시뮬레이션 환경은 자율주행시스템의 안전성 평가에 효율적으로 사용될 수 있으며, 자율주행차량의 안전성을 확보하는데 기여할 것이다.

## 후 기

본 연구는 IAMD, 2016년도 BK21플러스 사업(F14S N02D1310), 국토교통부 및 국토교통과학기술진흥원의 연구비지원(16PTSI-C054118-08)으로 수행된 연구임.

## 참고문헌

- (1) K. N. Qureshi and A. H. Abdullah, 2013, "A survey on intelligent transportation systems," Middle-East Journal of Scientific Research, vol. 15, pp. 629-642.
- (2) AutoNet2030, 2014, Co-operative Systems in Support of Networked Automated Driving by 2030.
- (3) R. Bours, M. Tideman, U. Lages, R. Katz, and M. Spencer, 2014, "Automated generation of virtual driving scenarios from test drive data," in Proceedings of FISITA World Congress.
- (4) B. Y. Jie, Zhang, Ning, Bian, JianPeng, Shi, Ling, Jin, XiCheng, Wang, JianGuang, Zhou, Zhao Ma, Yong Chen - Dong Feng Motor Corporation, D.-J. U. WeiWen, and H.-T. HanZhi, 2014, "Simulation and Testing of Advanced Driver Assistance System Based on Environmental Model of Pedestrian-Vehicle-Road," in FISITA 2014 World Automotive Congress, Maastricht, Netherlands.
- (5) D. Zhao, H. Peng, S. Bao, K. Nobukawa, D. LeBlanc, and C. Pan, 2016, "Accelerated evaluation of automated vehicles using extracted naturalistic driving data," in The Dynamics of Vehicles on Roads and Tracks: Proceedings of the 24th Symposium of the International Association for Vehicle System Dynamics (IAVSD 2015), Graz, Austria, 17-21 August 2015, p. 287.
- (6) C. Maag, D. Muhlbacher, C. Mark, and H. P. Kruger, 2012, "Studying Effects of Advanced Driver Assistance Systems (ADAS) on Individual and Group Level Using Multi-Driver Simulation," IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine, Vol. 4, pp. 45-54.
- (7) M. Tideman, R. Bours, H. Li, T. Schulze, and T. Nakano, 2013, "Integrated simulation toolset for ada system development," in Proceedings of the FISITA 2012 World Automotive Congress, pp. 25-36.
- (8) C. Sommer, 2011, "Bidirectionally coupled network and road traffic simulation for improved IVC analysis," IEEE transactions on mobile computing., Vol. 10, p. 3.
- (9) C. Wissing, T. Nattermann, K.-H. Glander, A. Seewald, and T. Bertram, 2016, "Environment Simulation for the Development, Evaluation and Verification of Underlying Algorithms for Automated Driving," in AmE 2016-Automotive meets Electronics; 7th GMM-Symposium, pp. 1-6.
- (10) R. Schubert, Mattern, N., Bours, R., 2014, "Evaluating Automated Vehicle Systems using Probabilistic Sensor Simulations," in ITS European Congress, Helsinki, Finland.
- (11) K. Abdelgawad, S. Henning, P. Biemelt, S. Gausemeier, and A. Tr chtler, 2016, "Advanced Traffic Simulation Framework for Networked Driving Simulators," IFAC-PapersOnLine, Vol. 49, pp. 101-108.
- (12) 문승욱, 2011, "Adaptive cruise control with collision avoidance for multi-vehicle traffics / 문승욱," 다차량 주행상황에서의 전구간 순항주행 및 충돌방지를 위한 차량제어, 서울 : 서울대학교 대학원, 2011, 서울.