

자율주행을 위한 레이더 기반 인지 알고리즘의 정량적 분석

이호준* · 채홍석* · 서호태* · 이경수*[†]Quantitative Analysis of Automotive Radar-based Perception
Algorithm for Autonomous DrivingHojoon Lee*, HeungSeok Chae*, Hotae Seo*, Kyongsu Yi*[†]

Key Words : Autonomous Driving(자율주행), Moving Vehicle Perception(이동차량인지), Point Cloud Processing(점군
집 데이터 처리), Quantitative Analysis(정량적 분석), Automotive Radar Data Processing(레이더 처리)

ABSTRACT

This paper presents a quantitative evaluation method and result of moving vehicle perception using automotive radar. It is also important to analyze the accuracy of the perception algorithm quantitatively as well as to accurately percept nearby moving vehicles for safe and efficient autonomous driving. In this study, accuracy of the automotive radar-based perception algorithm which is developed based on interacting multiple model (IMM) has been verified via vehicle tests on real roads. In order to obtain experimental data for quantitative evaluation, Long Range Radar (LRR) has been mounted on the front of the ego vehicle and Short Range Radar (SRR) has been mounted on the rear side of both sides. RT-range has been installed on the ego vehicle and the target vehicle to simultaneously collect reference data on the states of the two vehicles. The experimental data is acquired in various relative positions and velocity, and the accuracy of the algorithm has been analyzed according to relative position and velocity. Quantitative analysis is conducted on relative position, relative heading angle, absolute velocity, and yaw rate of each vehicle.

1. 서론

최근 고령운전자의 증가와 버스운전기사의 줄음으로 인한 대형 사고, 자동차 제작 기술의 향상으로 인해 자율주행자동차에 대한 관심이 증대되고 있다.⁽¹⁾ 그 중자동비상 제동 장치(AEB), 주행 조향 보조 시스템(LKAS) 등 자율주행기술의 기초가 되는 일부 기술들은 능동안전 시스템(ADAS)으로서 이미 상용화 되었으며, 능동안전 시스템에 대한 소비자들의 요구는 지속적으로 증가하고 있다. 또한 자동차 및 자동차부품의 성능과 기준에 관한 규칙 제 15조의 2에 따라 자동차안전성제어장치(ESC)

및 타이어공기압 경고장치(TPMS) 등의 능동안전시스템 중 일부는 2012년 이후 생산 차량과 그 장착이 의무화 되었다. 이처럼 능동안전시스템이 일반화 됨에 따라서 단순히 운전자를 보조하는 수준 이상의 자율주행시스템에 대한 연구가 여러 분야에서 이루어지고 있다.⁽²⁾

소비자들의 자율주행 시스템에 요구하는 성능이 점점 고도화 되면서 자율주행차량이 처리해야할 주변 환경의 시나리오들은 더욱 다양해졌으며,⁽³⁾ 이러한 상황에 대처하기 위해 자율주행시스템은 더욱 복잡해 졌다.⁽⁴⁾ 특히 다양한 주변 환경 시나리오에 대응하기 위해서는 주변 환경 인지를 위해 더 많은 센서와 더 정밀한 센서의 장착이 요구된다.⁽⁵⁾ 반면 가격 경쟁력 면에서 본다면 자율주행시스템에 장착되는 주변 환경 인지 센서는 최소화 되어야

* 서울대학교 기계공학과

E-mail : whiteout92@snu.ac.kr

한다.^(6,7) 따라서 자율주행시스템의 주변 환경 인지 센서의 성능과 수량을 최적화하여야 하며, 이를 위해서는 환경인지 센서를 이용한 자율주행시스템의 인지 성능을 정량적으로 평가할 필요가 있다.^(8,9)

인지 성능을 정량적으로 평가하기 위해서는 몇 가지 어려움이 있는데, 우선 인지 성능은 차량간의 거리, 차량간의 상대적인 위치, 상대 속도 등 자율주행차량과 상대 차량의 상태에 영향을 받는다. 또한 도로의 곡률, 도로의 굴곡, 기상 상태 등 인지 환경의 상태에 따라서도 인지 성능이 달라지며, 마지막으로 가장 어려운 점은 자율주행차량과 상대 차량의 상대 거리, 상대 속도 등의 참값을 측정하기 어렵다는 점이다.

본 연구에서는 이러한 인지 성능 정량적 평가의 어려움을 극복하기 위해 다양한 방법을 사용하였다. 우선 자율주행차량과 상대 차량의 상태의 참값을 측정하기 위해서 RT-range 장비를 이용하였으며, 이 장비의 측정값을 통해 두 차량의 상대 위치 및 상대 각도의 참값을 도출하였다. 두 차량의 상대적인 위치와 속도, 도로의 곡률에 따라 인지 성능이 변하는 것 고려한 실험 시나리오가 선택되었다.

본 논문은 5 개의 장으로 이루어져 있다. 1 장을 서론으로서 본 연구의 목적과 필요성을 서술하였으며, 2 장은 본 연구에서 사용한 자율주행차량과 이를 이용한 인지 알고리즘에 대한 설명으로 구성되었다. 3 장에서는 RT-range를 이용한 정량적 인지 성능 평가를 위한 실험 방법을 기술하였고, 4 장에서는 실험 자료를 통한 정량적 평가가 이뤄졌다. 마지막 5 장에서는 본 연구에 결과에 대한 분석과 앞으로 연구 방향에 대한 제언이 담겨 있다.

2. 레이더 기반 차량 인지

2.1. 자율주행차량의 구성

본 연구에서 활용된 자율주행차량은 Fig. 1과 같다. 차량은 중형 세단 차량이며 일반 차량에 각종 인지 센서를 장착하여 자율주행시스템을 구축하였다. 차량 전방에 Long Range Radar(LRR)과 Light Detection And Ranging(Lidar)가 장착되어 있으며, 차량 실내에 Vision sensor가 장착되어 있다. 양쪽 후측방 범퍼에 Short Range Radar(SRR)과 Lidar가 각각 한 개씩 장착 되어 있다. 본 연구에서 사용한 인지 알고리즘은 Vision sensor를 이용한 차선 정보와 LRR과 SRR 2개를 이용하여 차량을 인지하는 알고리즘이다.



Fig. 1 Hardware configuration of the autonomous driving system

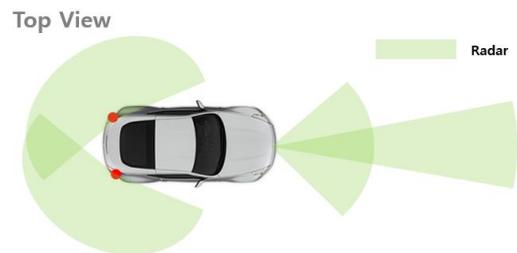


Fig. 2 The field of view of the autonomous driving system

자율주행차량의 Radar를 이용한 감지 범위는 Fig. 2와 같다. 전방은 LRR을 이용하여 120m까지 감지 가능하며 측후방은 SRR을 이용하여 60m까지 감지 가능하다. 전 측방에 양쪽으로 25° 정도의 감지 불가 영역이 존재한다.

2.2. 레이더 기반 인지 알고리즘

이 절에서는 본 연구에서 정량적 분석이 이뤄진 레이더 기반 인지 알고리즘에 대한 개략적인 설명을 하겠다. 본 연구에서 사용된 인지 알고리즘은 Kim(2015)에 의해 제안된 IMM/EKF based multi-target state estimation⁽¹⁰⁾ 알고리즘으로 Interacting multiple model(IMM)과 Global nearest neighbor(GNN)을 이용하여 각각의 트랙에 대한 적절한 레이더 측정값을 찾고 Extended Kalman filter를 이용하여 업데이트 하는 방식이다. 논문 면수가 제한되어 있기 때문에 인지 알고리즘에 대한 자세한 설명은 생략하였다.

2.2.1. 레이더 기반 인지 알고리즘의 전체 구조

본 연구에서 활용한 레이더 기반 인지 알고리즘의 전체 구조는 Fig. 3과 같다. 자차량의 휠속과 Yawrate 센서

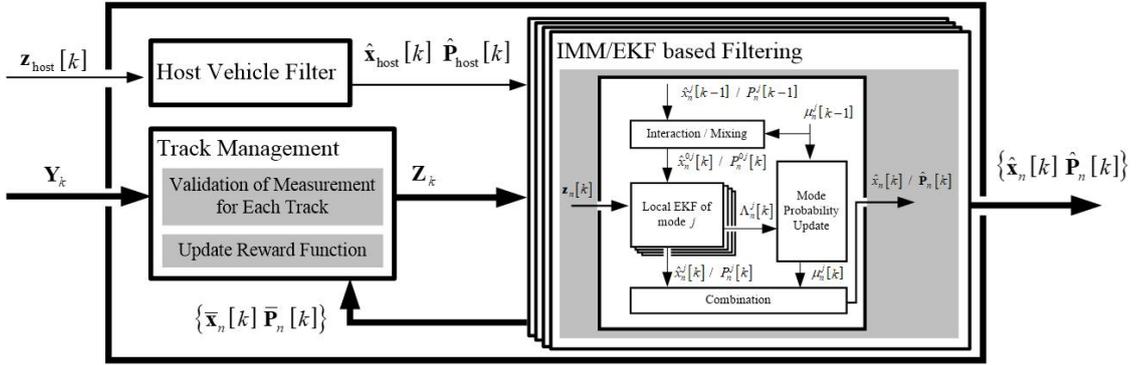


Fig. 3 Architecture of IMM/EKF multitarget state estimation

를 이용하여 자차량의 위치와 요각을 추정하고, 레이더의 측정 데이터와 이전 스텝의 인지된 차량들의 정보를 이용해서 각 트랙에 적절한 레이더 측정 데이터를 분배한다. 각 트랙에 적절한 레이더 측정 데이터를 분배하는 방식은 GNN으로 각 측정 데이터의 정확도와 이전 스텝에 인지된 차량들의 정확도를 고려하여 가장 근접한 데이터를 각각의 차량에 대한 측정값으로 분배하는 것을 의미한다. 이후 각각의 트랙들에 대해서 IMM/EKF based filtering을 통해서 주변 차량의 상태를 추정한다.

2.2.2. Multiple Process Model

IMM의 장점은 다양한 process model 및 measurement model을 이용해서 하나의 모델로 표현하기 힘든 다양한 거동을 추정할 수 있다는 점이다. Fig. 4와 같이 주행상황에서 상대 차량은 등속 운동, 차선 변경, 감속, 가속 등의 다양한 거동을 보일 수 있다.

이러한 모든 변화를 하나의 process model을 이용해서 대응하기 위해서는 결국 process update의 정확도를 매우 낮게 설정해야 하고 이는 곧 추정기의 성능 저하를 의미한다. 따라서 각각의 예상 가능한 거동을 모델링하여 추정에 활용함으로써 추정기의 성능을 향상시킬 수 있다.

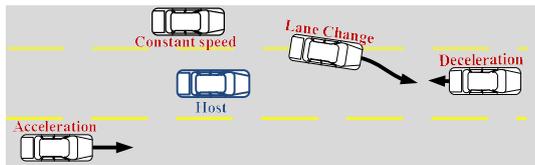


Fig. 4 Various driving patterns of multi target vehicles

2.2.3. Multiple Measurement Model

레이더의 경우 하나의 차량당 하나 또는 그 이상의 점을 측정하며 그 점에 대한 상대 거리, 각도, 상대 속도를 알 수 있다. 하지만 실제 차량은 점이 아니고 상당한 크기의 물체이기 때문에 레이더의 측정값이 상대 차량의 어느 부분을 측정 한 것 인지 알아야 정확한 추정이 가능하다. 하지만 이것은 불가능 하고, Fig. 5와 같이 적절한 가정과 점의 거동에 따른 분석을 통해서 레이더의 측정값이 상대

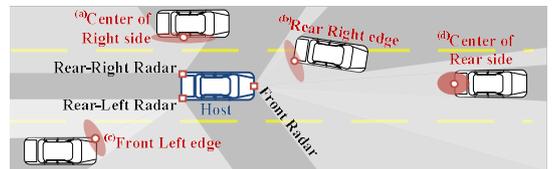


Fig. 5 Various measurement patterns of multi target vehicles

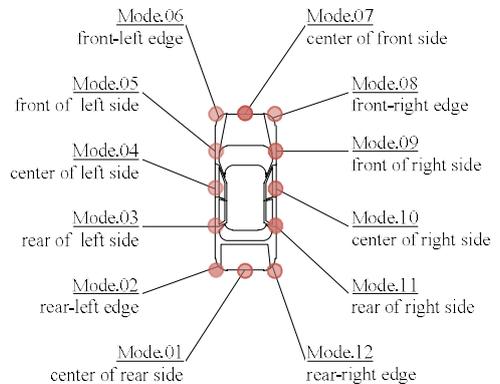


Fig. 6 The twelve modes of measurement model to describe various measurement patterns

차량의 어느 부분을 나타내는지 확률적으로 추정해야 한다. 따라서 Fig. 6과 같이 12 개의 모드로 나눠서 측정값을 분석하였다.

3. 정량적 인지 성능 평가 실험 설계

지금까지 정량적 인지 성능 평가가 이뤄질 자율주행시스템과 레이더 기반 인지 알고리즘에 대해서 간략하게 소개하였다. 이번 장에서는 본격적으로 인지 알고리즘의 성능에 대한 정량적 평가를 위한 방법에 대해 논하겠다. 3.1 절에서는 RT-range 를 통해서 얻은 데이터를 통해서 두 차량의 상태에 대한 참값을 구하는 방법에 대하여 논할 것이며, 3.2 절에서는 정량적 인지 성능 평가를 위해 본 연구에서 수행한 실험 방법에 대해 설명하겠다.

3.1. RT-range를 이용한 실시간 상대위치 측정

OxTS 사의 RT-range 장비와 2 대의 RT 장비(GPS)를 이용하면 실시간으로 이동하는 2 대의 차량의 위치, 요각, 속도, yawrate 값을 상당한 정확도로 측정 할 수 있다. 특히 GPS와 base station을 통한 보정 정보 및 관성 센서 정보를 모두 활용할 수 있을 경우 위치의 경우 약 2cm 요각은 0.05°의 오차범위 내에서 실시간으로 측정이 가능하다. 따라서 이렇게 측정된 값은 자율주행시스템의 관점에선 충분히 정확하다 볼 수 있으며, 인지 성능을 평가할 때 참값으로 간주할 수 있다. 하지만 이때 측정되는 값은 각 차량에 부착된 GPS 장비의 위치이고 인지 알고리즘이 추정하는 결과는 두 차량의 기하학적 중심에 대한 상대 위치 이므로 이에 대한 보정이 필요하다.

$$T_{03} = T_{01} \cdot T_{12} \cdot T_{23}$$

$$T_{ij} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & p_x \\ \sin\theta & \cos\theta & p_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

θ : i 좌표계에 대한 j 좌표의 각도
 p_x : i 좌표계에서 표현된 j 좌표계 원점의 x 좌표
 p_y : i 좌표계에서 표현된 j 좌표계 원점의 y 좌표

GPS를 통한 측정값과 추정값의 차이는 Fig. 7에 표현되어 있다. 두 차량의 GPS 측정값을 통해 계산되는 상대 위치는 T_{12} 이고 레이더 기반 인지 알고리즘을 통해 구해

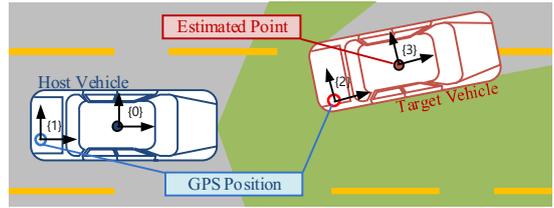


Fig. 7 The difference between GPS measurement and estimated point

지는 값은 T_{03} 이다. 이 차이는 식 (1)에 의해서 T_{01} , T_{23} 을 구할 수 있다면 보정 가능하다. 다행히도 T_{01} , T_{23} 는 각 차량에서 GPS 장비가 장착된 위치를 통해 구할 수 있다. 따라서 이 차이는 식 (1)을 통해서 보정 될 수 있다.

3.2. 정량적 인지 성능 평가를 위한 실험 설계

앞서 설명했듯이 자율주행시스템의 인지 성능은 도로 환경, 기상 환경 또는 자율주행차량과 상대 차량의 상태 등 다양한 요인에 영향 받는다. 이상적으로 본다면 모든 변인에 대해 다른 변인을 통제한 상태에서 실험을 각각 진행하여 정량적 평가를 하는 것이 옳다. 하지만 실제 차량을 통한 실험이기 때문에 변인 통제가 쉽지 않고, 모든 경우에 대해 실험을 진행하는 것은 불가능에 가깝다. 따라서 본 연구에서는 직선로와 곡선로가 50%씩 구성되도록 1.2km 실험 코스를 정했고, 기상 환경 역시 맑은 날로 제한하였다. 또한 자율주행차량과 상대 차량의 상대속도는 15kph 이하가 되도록 하였다. 본 연구에서는 자율주행차량에 대한 상대 차량의 위치에 따른 인지 성능과 자율주행 차량의 속도에 따른 인지 성능을 분석하였다.

상대 위치는 Fig. 8에 나타난 것과 같이 전방, 전측방, 후측방, 후방 이상 4 가지 경우로 구분했다. 각각의 상대 위치에서 3번의 실험이 이뤄졌다. 매 측정은 위에서 언급한 동일한 1.2km 코스에서 이뤄졌다. 3 번의 주행 실험에서 두 차량의 속도는 0~15kph, 40kph, 80kph 였다. 각

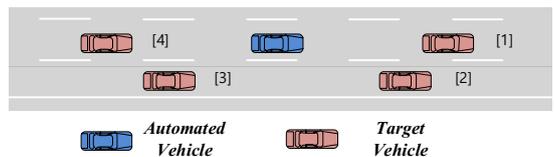


Fig. 8 The four cases of relative position

각의 속도는 도심 정체 상황, 도심 주행 상황, 고속도로 주행 상황을 모사하기 위해 선정했다. 모든 실험에서 자율주행차량 및 상대 차량의 차선 변경은 없었으며, 정해진 속도에서 $\pm 8\text{kph}$ 범위의 임의적인 속도 변화를 통해 다양한 인지 환경을 구현했다.

4. 정량적 인지 성능 평가

4.1. 상대 위치에 따른 인지 성능 평가

3 장의 방법을 이용해 취득된 데이터를 이용하면 주행 중 10Hz 빈도로 자율주행 차량에 대한 상대 차량의 종방향 위치, 횡방향 위치, 요각, 속도, yawrate에 대해서 GPS 장비를 이용한 측정 값 및 레이더 기반의 인지 알고리즘을 이용한 추정값을 모두 취득할 수 있다. 이 추정값과 GPS 측정값의 차이를 식 (2)와 같이 계산하고 이를 각 상태에 대한 오차로 정의하면 자율주행시스템의 인지 성능을 정량적으로 평가 할 수 있다.

$$Error = Estimated\ state - GPS\ measurement\ (2)$$

식 (2)를 통해 구한 오차를 주행 데이터에 대해서 누적하여 그 분포를 분석하면 자율주행시스템의 인지 성능

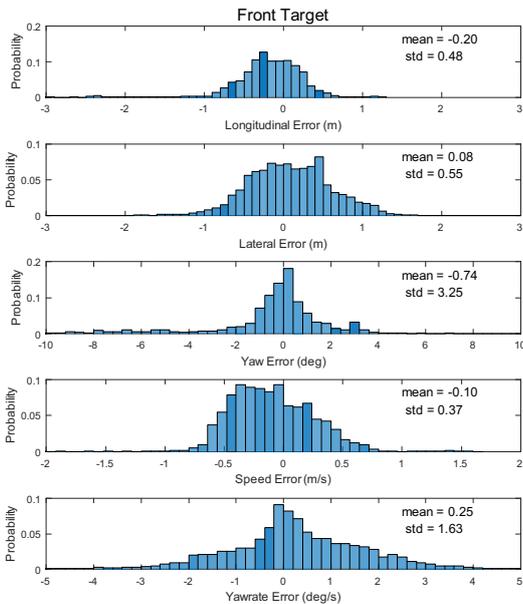


Fig. 9 Error distribution about front vehicle

을 정량적 지표로 나타낼 수 있다. 오차 분포의 평균과 표준편차는 해당 자율주행시스템의 인지 성능을 대표하는 중요한 지표이다. 특히 표준편차는 인지 성능에 절대적인 영향을 미치므로 표준편차의 크기를 통해 인지 성능을 비교 할 수 있다.

Fig. 9는 전방 차량에 대한 인지 결과를 누적하여 히스토그램으로 나타낸 것이다. 속도에 관계 없이 상대 차량의 위치에 따라서 분류 한 것이므로 0~80kph에서의 인지 성능을 모두 포괄하고 있다. 각각의 그래프는 위에서부터 종방향 거리, 횡방향 거리, 요각, 속도, yawrate의 오차를 히스토그램으로 나타낸 것이며 x축이 오차, y축이 전체 도수에 대한 비율을 확률로 나타낸 것이다. 모든 상태에 대해 평균 값이 0에 가까우므로 추정기가 치우침 없이 5가지 상태를 추정하고 있음을 알 수 있다.

Table 1은 오차의 표준편차를 상대 차량의 위치에 따라 분류 한 것이다. 모든 영역에 대해서 적절한 추정이 이뤄짐을 알 수 있다. 전방에 대한 위치 오차가 전측방이나 후측방, 후방에 있는 차량에 대한 위치 오차보다 유의미하게 작은 것을 알 수 있다. 이는 전방의 차량의 경우 2.2.3항에서 설명한 12개의 모드 중 가장 고려해야 할 모드가 적으며, LRR이 SRR 보다 성능이 좋기 때문에 발생하는 현상이다. 횡방향 위치 오차가 종방향 위치 오차보다 작은 이유는 차량의 옆면이 레이더에 감지될 경우 약 4.5m에 이르는 차량의 옆 면 중에서 어느 곳이 측정된 것인지 확률적으로 추론해야 하는 반면 차량의 앞면 또는 뒷면이 측정될 경우 약 1.8m 정도의 차량의 폭 만큼만 확률적으로 고려하면 됨으로 발생하는 현상이다. 한 가지 더 주목할 점은 후방 차량에 대한 요각 추정 오차가 다른 위치에 있는 차량의 요각을 추정할 때 보다 유의미하게 정확하다는 점이다. 이는 차량의 운동학적 특성상 요각에 대해 차량 후방 보다 차량 앞면의 위치가 더 영향을 많이 받기 때문이다.

Table 1 The standard deviation of the error according to relative position

	전방	전측방	후방	후측방
[m]	0.48	1.33	1.18	1.81
[m]	0.55	0.57	0.76	0.72
[deg]	3.25	3.20	2.77	3.43
[m/s]	0.37	0.72	0.83	1.41
[deg/s]	1.63	1.64	1.68	1.74

Table 2 The standard deviation of the error according to the speed of host vehicle

	0~15[kph]	15~40[kph]	40~80[kph]
[m]	1.00	1.12	0.31
[m]	0.55	0.52	0.62
[deg]	3.51	1.68	1.19
[m/s]	0.57	0.63	0.36
[deg/s]	1.60	1.71	1.69

4.2. 자율주행차량의 속도에 따른 인지 성능 평가

속력에 따른 인지 성능 평가 역시 4.1절에서 설명한 것과 마찬가지로 전체 데이터를 자율주행차량의 속도에 따라 인지 성능을 평가할 수 있다. 그 결과 속도에 대해서도 추정에서의 편향은 없었다. 각 상태에 대한 오차의 표준 편차는 Table 2에 나타났다.

자율주행차량의 속도에 따른 인지 성능에서 눈 여겨볼 만한 점은 요각에 대한 추정 성능이다. 요각에 대한 인지 성능은 차차량의 속도가 증가함에 따라 유의미하게 정확도가 상승하는 것을 볼 수 있다. 이러한 현상이 나타나는 이유는 레이더를 이용한 차량인지의 경우 차량의 형상을 직접 파악할 수 없기 때문에 측정값의 변화를 필터링 함으로써 추정 해야한다. 따라서 속도가 빠르면 요각의 추정이 더 용이하기 때문에 이와 같은 인지 성능 향상을 볼 수 있다.

5. 결 론

본 연구를 통해서 자율주행시스템의 인지 성능에 대한 정량적이 평가 방법이 제안되었고, 실제 자율주행차량과 RT-range를 이용한 평가가 수행되었다. 인지 성능에 영향을 미치는 도로의 형상, 기상 상태, 차량의 상태 중 차량의 상태에 따른 인지 성능의 분석이 수행되었으며 차량의 상태에 따라 인지 성능에 타당한 변화가 있음을 볼 수 있었다. 이러한 자율주행시스템의 정량적 인지 성능 분석은 자율주행시스템의 안전성 확보 및 센서 최적화에 필수적이다. 앞으로 좀더 다양한 실험을 통해 본 연구에서 분석하지 못한 요인에 의한 인지 성능의 분석이 이뤄진다면, 안전한 자율주행 시대를 여는데 기여할 것이다.

후 기

본 논문은 산업통상자원부 산업기술혁신사업(10079730, 자동차전용도로/도심로 자율주행 시스템 개발 및 성능평가) 및 국토교통부 및 국토교통과학기술진흥원의 연구비 지원(17TLRP-B117133-02)와 미래창조과학부의 재원(NRF-2016R1E1A1A0194 3543)으로 한국연구재단의 의 지원을 받아 수행하였습니다.

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) F. Paetzold and U. Franke, 2000, "Road recognition in urban environment", *Image and Vision Computing*, Vol. 18, pp. 377~387.
- (4) R. Bours, M. Tideman, U. Lages, *et al.*, 2014, "Automated generation of virtual driving scenarios from test drive data", in *Proceedings of FISITA World Congress*.
- (5) H. Cho, Y.-W. Seo, B. V. Kumar, *et al.*, 2014, "A multi-sensor fusion system for moving object detection and tracking in urban driving environments", in *Robotics and Automation (ICRA), 2014 IEEE International Conference on*, pp. 1836~1843.
- (6) J. Wei, J. M. Snider, J. Kim, *et al.*, 2013, "Towards a viable autonomous driving research platform", in *Intelligent Vehicles Symposium (IV), 2013 IEEE*, pp. 763~770.
- (7) A. Broggi, M. Buzzoni, S. Debattisti, *et al.*, 2013, "Extensive tests of autonomous driving technologies", *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 14, pp. 1403~1415.
- (8) B. Y. Jie, Zhang Ning, Bian JianPeng, Sh Ling, Jin XiCheng, Wang JianGuang, Zhou Zhao Ma Yong Chen 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.
- (9) T. Unselt, C. Mayer, E. Chin, *et al.*, 2011, “Assessment of behavioral aspects in integrated safety systems (EU FP7 project ASSESS)”, in *ESV Conference Paper*.
- (10) B. Kim, K. Yi, H.–J. Yoo, *et al.*, 2015, “An IMM/EKF approach for enhanced multitarget state estimation for application to integrated risk management system”, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 64, pp. 876–889.