

자율주행차량의 객체 검출을 위한 카메라-라이다 센서 시각 동기화 방안 연구

최경수¹, 사의환², 김성진², 강대수¹, 이정욱^{1,2*}
¹공주대학교 정보통신공학과, ²한국자동차연구원

A Study on the Time Synchronization Method of Camera-Lidar Sensor for Object Detection in Autonomous Vehicles

Kyoung Soo Choi¹, Yui Hwan Sa², Sung Jin Kim², Dae Soo Kang¹, Jung Uck Lee^{1,2*}
¹Kongju National University Division of Information and Communication Engineering
²Korea Automotive Technology Institute

요약 최근 자율주행차량에 관한 다양한 연구가 진행되고 있으며 특히, 인공지능 학습을 위한 GPU와 주변 하드웨어 성능 향상으로 주변 객체 검출을 통해 자율주행차량을 지원하고 있다. 객체 검출을 위한 대표적인 센서는 카메라, 라이다, 레이더가 있으며, 단일 센서의 인지 능력보다 다중 센서의 융합을 통해 검출 정확도를 높이는 것이 높은 신뢰성을 요구하는 자동차 분야에서 선호하는 방식이다. 따라서, 본 논문에서는 카메라와 라이다 센서의 융합 방식을 채택했다. 인공지능 학습 성능을 높이기 위한 요인 중 이기종 센서 간 캘리브레이션과 정밀한 시각 동기화 방식을 통한 객체 검출 성능 검증을 수행했다. 캘리브레이션 방식은 크게 체커보드 기반, 비 목표물 기반, 딥러닝 기반으로 구성되어 있고, 그 중 Zhang's method 기반 캘리브레이션을 진행하였으며 회전 오차: 0.80°, 이동 오차: 0.02m, 재투영 오차: 7.63 픽셀의 결과를 도출했다. 다중 센서의 시각 동기화는 트리거 신호의 주기와 근적외선 카메라를 통해 확인하였고, 차량의 속도 별 투영 이미지를 이용하여 정성적인 성능을 검증했다.

Abstract Various studies on autonomous vehicles have been conducted. In particular, autonomous vehicles are supported by detecting the surrounding objects by improving the GPU and surrounding H/W performance for artificial intelligence (AI) learning. Representative sensors for object detection include cameras, lidar, and radar, and it is preferred in the automotive field, requiring high reliability to increase detection accuracy through the fusion of multiple sensors rather than the cognitive ability of a single sensor. Therefore, this paper used the convergence method of camera and lidar sensors. Object detection performance was verified through calibration between heterogeneous sensors and precise time synchronization to improve the AI learning performance. The calibration method is largely checkerboard-based, non-target-based, and deep learning-based, of which checkerboard-based calibration was conducted. The following results were derived: rotation error, 0.80°; translation error, 0.02m; reproduction error, 7.63 pixels. Time synchronization of various sensors was confirmed from the period of the trigger signal and the near-infrared camera, and qualitative performance was verified using projection images by the vehicle speed.

Keywords : Time Synchronization, Camera-lidar Calibration, Autonomous Vehicle, Performance Verification, Object Detection

본 논문은 2023년도 정부(경찰청)의 재원으로 과학기술정보통신부의 지원을 받아 수행된 연구임 (No.092021C28S02000, 협력적 교통제어전략 도입을 위한 교통정보 음영구간 정보 생성 및 운영관리 기술 개발)

*Corresponding Author : Jung Uck Lee(Korea Automotive Technology Institute)

email: julee@katech.re.kr

Received September 1, 2023

Revised October 5, 2023

Accepted October 6, 2023

Published October 31, 2023

1. 서론

자율주행에 필요한 객체 검출을 위해 인공지능 학습 데이터 구축 사업이 한창 진행되고 있다. 학습 대상 객체가 다양해지고, 자율주행차량을 지원하는 연구도 활발하게 진행되고 있다. 대표적인 예로 KITTI, nuScenes, Waymo Open Dataset에서 사용하는 차량, 이륜차, 보행자 등이 있으며, 동적 객체의 움직임에 따른 자율주행 차량의 회피, 경로 예측에 활용된다. 정밀 도로 지도의 속성에 해당하는 노면 표시, 도로 객체의 글로벌 좌표를 갖는 정적 객체 대상으로 자율주행차량이 GPS 음영지역에서 검출된 객체 클래스와 3차원 거리 좌표로 자차의 위치를 추정하는 기법에도 활용되고 있다. 자율주행차량에 객체 검출 알고리즘을 적용하기 위해 인공지능 학습 기법도 매우 중요하지만, 학습을 위한 양질의 데이터를 구축하는 것과 다중 센서의 캘리브레이션이 반드시 선행되어야 한다. 양질의 학습용 데이터는 이기종 센서 간의 시각 동기화가 정확하게 이루어지는 것을 의미하며, 캘리브레이션은 서로 다른 좌표계를 갖는 이기종 센서에 대해 좌표계를 일치시키는 것을 의미한다.

따라서 본 연구의 목적은 자율주행차량의 객체 검출을 위한 카메라-라이다 센서의 학습 데이터를 구축하기 위해 이기종 센서 간 시각 동기화와 캘리브레이션 방법에 대해 제안하고자 한다. 체커보드를 이용한 카메라-라이다 캘리브레이션과 소프트웨어 시각 동기화 방식을 보완한 하드웨어 시각 동기화를 통해 학습 데이터의 성능을 높임으로써 객체 검출 알고리즘 학습에 사용하고자 하였다.

본 논문 1장은 연구 배경과 목적을 기술했고, 2장은 카메라-라이다 캘리브레이션과 하드웨어 시각 동기화의 선행 연구와 원리를 기술했다. 3장은 본 연구에서 제안한 캘리브레이션 방안을 제시하고, 4장은 이기종 센서 간 시각 동기화 방법을 기술했다. 5장은 본 연구에서 제안한 방식으로 설계된 센서 데이터 구축 시스템에 대한 정성적인 결과를 기술했고, 6장은 본 연구의 결과 요약과 향후 연구 계획을 기술하였다.

2. 연구의 선행 연구 및 원리

카메라-라이다 센서의 캘리브레이션과 이기종 센서 시각 동기화를 연구한 논문으로는 목표물 기반과 목표물을 사용하지 않는 캘리브레이션, 딥러닝 방식을 소개하며 분석 및 실험한 연구, 객체 검출을 위해 카메라-라이

다 센서의 캘리브레이션 원리와 센서 융합 연구, GPS의 PPS(Pulse Per Second) 신호를 통해 트리거 신호를 발생시켜 라이다-카메라를 시각 동기화하는 연구를 참고했다[1-4]. 객체 검출 정확도를 높이기 위해 선행된 연구를 기반으로 Fig. 1에 나타난 체커보드 기반 캘리브레이션 방식과 Fig. 2에 라이다의 스캔 각도에 따른 트리거 신호를 발생시키는 방식으로 수행하였다.

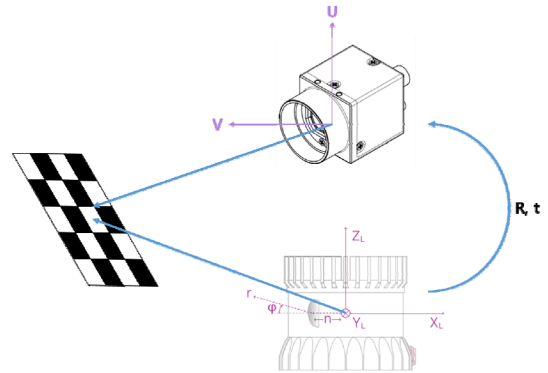


Fig. 1. Method of camera-LiDAR calibration

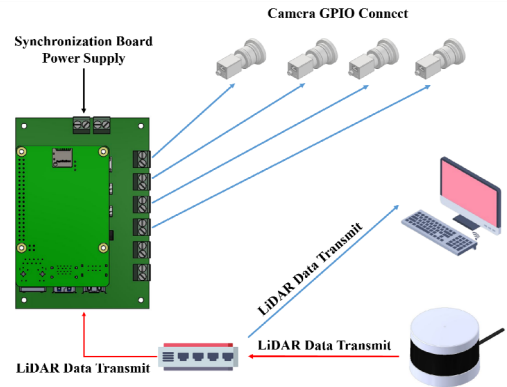


Fig. 2. Sensor synchronization configuration

본 연구에서 수행한 카메라-라이다 센서 간 캘리브레이션은 이미지와 포인트 클라우드의 좌표 체계가 서로 다르게 되어 있어, 좌표계를 통일시켜주는 파라미터 추출 과정이라고 할 수 있다. 카메라의 렌즈와 이미지 센서의 거리에 따라 왜곡되는 이미지 보정을 위한 카메라 내부 파라미터와 카메라의 2차원 좌표, 라이다의 3차원 좌표의 상관관계를 나타내는 외부 파라미터를 추출하였다.

카메라-라이다 센서 시각 동기화는 카메라가 장착된 각도를 라이다 센서 스캔하는 시점에 하드웨어 트리거 신호를 입력하여 같은 시간에 촬영하도록 구성하는 방식이다[5,6]. 카메라는 트리거 신호를 입력받을 수 있는 기

종이어야 하며, 하드웨어 센서 패키지에 각도별로 장착되어야 한다. 운영체제가 탑재된 시각 동기화 보드에서 라이다 센서에서 입력받은 데이터를 읽어 원하는 각도에서 트리거 출력을 내고, 카메라의 GPIO 포트에 입력된 에지 신호에 따라 이미지를 촬영하였다. 라이다 센서가 360° 스캔하는 시간인 0.1초마다 트리거 신호 발생 여부를 확인하거나, 근적외선 카메라를 통해 특정 각도에서 라이다 센서의 적외선이 일정하게 촬영되는지 확인하였다.

3. 카메라-라이다 캘리브레이션

카메라-라이다 캘리브레이션 과정은 카메라 캘리브레이션을 통해 내부 행렬을 도출하고, 이를 통해 카메라-라이다의 외부 행렬을 도출하였다. 사용된 카메라(FLIR-BFS Series) 및 라이다(Ouster-OS1-128)는 다음 Fig. 3과 같다.

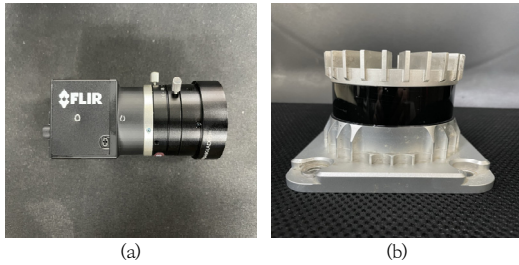


Fig. 3. Camera and LiDAR
(a) FLIR-BFS series (b) Ouster-OS1-128

카메라 내부 행렬 도출을 위해 핀홀 카메라 모델을 기반으로 체커보드를 활용하는 Zhang's Method를 사용하여 도출하였다[7,8]. 핀홀 카메라 모델에서 세계 좌표의 3D 포인트와 이미지 좌표의 투영 방정식은 다음 Eq. 1과 같다.

$$W \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = P \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Where, W denotes scale factor, x,y denotes image points, P denotes camera matrix, X,Y,Z denotes world points

이때, Eq. 1의 카메라 행렬인 P는 Eq. 2와 같이 정의된다[9].

$$P = K[Rt] \quad (2)$$

Where, K denotes intrinsic matrix, R denotes Rotation, t denotes Translation

내부 행렬 K와 외부 행렬 R,t는 Eq. 3과 같이 정의되며, 세계 좌표의 3D 포인트와 이미지 좌표의 투영 방정식은 Eq. 4 와 같이 정의된다.

$$K = \begin{bmatrix} f_x & Skew_{cf_x} & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad [Rt] = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_1 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_2 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_3 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Where, f_x, f_y denotes focal length, c_x, c_y denotes optical center, $Skew_{cf_x}$ denotes Skew coefficient, r_{nm} denotes rotation, t_n denotes translation

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & Skew_{cf_x} & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_1 \\ r_{21} & r_{21} & r_{23} & t_2 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Eq. 4를 기반으로 체커보드를 사용하여 카메라 캘리브레이션을 진행하였으며, 사용된 체커보드의 규격과 캘리브레이션 결과는 Table 1 및 Fig. 4와 같다.

Table 1. Checker board spec

Spec.	Value	Note
Size	800x1100 mm	
Checker Size	100 mm	No padding



Fig. 4. Checker board

Table 2. Camera calibration result

Parameters	Value
Fx / Fy	2322.938 / 2325.676
Cx / Cy	1212.330 / 1038.485
Reprojection Error	0.259

Table 2의 카메라 캘리브레이션 결과를 활용해서 Fig. 1의 카메라-라이다 캘리브레이션을 Fig. 5와 같은 과정으로 진행하였다. 먼저 정지 상태에서 Fig. 4의 체커 보드를 지면에 세워놓고 카메라 이미지 데이터 및 라이다 포인트 클라우드 데이터를 취득하였다. 이후 카메라 및 라이다 데이터의 체커보드 특징점을 추출한다. 추출된 특징점을 기반으로 카메라-라이다의 외부 파라미터를 도출하고 캘리브레이션 결과를 얻었다.

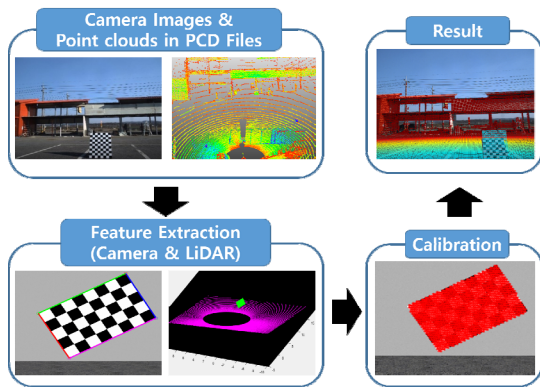


Fig. 5. Camera-LiDAR calibration process

카메라-라이다 캘리브레이션은 위의 Fig. 5와 같이 진행된다. 외부 행렬의 회전 및 이동은 다음 Eq. 5와 같이 정의된다. 캘리브레이션은 MATLAB의 라이다 Toolbox를 활용해 진행하였으며 결과는 Table 3 및 Fig. 6과 같다[10].

$$\begin{aligned}
 \text{Roll Matrix} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\text{roll}) & -\sin(\text{roll}) \\ 0 & \sin(\text{roll}) & \cos(\text{roll}) \end{bmatrix} & (5) \\
 \text{Pitch Matrix} &= \begin{bmatrix} \cos(\text{pitch}) & 0 & \sin(\text{pitch}) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\text{pitch}) & 0 & \cos(\text{pitch}) \end{bmatrix} \\
 \text{Yaw Matrix} &= \begin{bmatrix} \cos(\text{yaw}) & -\sin(\text{yaw}) & 0 \\ \sin(\text{yaw}) & \cos(\text{yaw}) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 \text{Rotation Matrix} &= \text{Yaw Matrix} * \text{Pitch Matrix} * \\
 &\quad \text{Roll Matrix} \\
 \text{Translation Vector} &= [px \ py \ pz]
 \end{aligned}$$

Table 3. Camera-LiDAR calibration result

Parameters	Value
Roll / Pitch / Yaw	-79.140 / 0.810 / -88.207
px / py / pz	1.149 / -0.082 / -0.758
Translation Error	0.021
Rotation Error	0.809
Reprojection Error	7.631

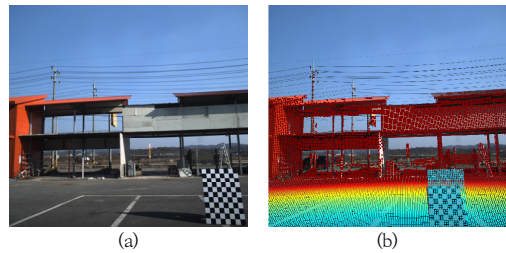


Fig. 6. Camera-LiDAR calibration result
(a) Original image (b) LiDAR projection image

4. 카메라-라이다 시각 동기화

4.1 카메라-라이다 센서 동기화 보드

카메라와 라이다 시각 동기화를 위해 카메라의 GPIO 포트에 트리거 신호를 입력하는 동기화 보드를 Fig. 7과 같이 제작하였다.

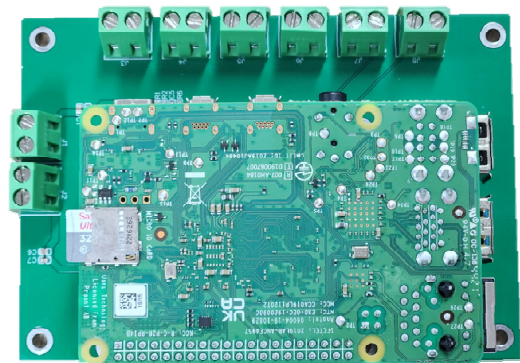


Fig. 7. The synchronization board

라즈베리파이 보드를 사용하여 이더넷 인터페이스로 라이다 센서의 데이터를 입력받고, 라이다 제조사에서 제공하는 API(Application Programming Interface)를 통해 디코딩하여 원하는 각도별로 트리거 신호를 출력하는 방식이다. 카메라는 전방위로 4개를 사용하여 각 0°, 90°, 180°, 270°에서 GPIO 포트에 트리거 신호를 입력받아 촬영한다. 라이다 센서 데이터는 목적지 IP를 broadcast로 세팅하여 이더넷 스위치를 통해 라즈베리파이와 데이터 저장 PC에 전송한다. 데이터 전송 속도는 1Mbps로 패킷 전송이 약 2.0e-9초이며, 라즈베리파이의 프로세서 속도는 1.6GHz로 GPIO 출력 속도는 6.25e-10초로 미세한 전송 지연이 발생하나, 무시할 수 있는 수준으로 설계 시 고려하지 않았다. 라이다 모드는

512x20, 512x10, 1024x10, 1024x20, 2048x20을 모두 지원하도록 제작했으며, 출력 속도별 트리거 신호 방향각은 마찬가지로 전방위 트리거 신호를 지원한다. 아래 성능 검증은 기본값인 1024x10 모드로 진행했다.

4.2 카메라-라이다 센서 동기화 보드 성능 검증

카메라-라이다 센서 동기화 보드가 의도한 설계대로 전방위에서 트리거 신호를 받아 카메라가 촬영하는지를 확인하였다. 성능 검증하는 방식은 2가지로 교차 검증하였다.

첫 번째는 방위각별로 트리거 신호가 발생하는지 오실로스코프로 측정하는 방식이다. 라이다 센서의 데이터 출력은 10Hz로 트리거 신호도 스캔 주기에 맞는 10Hz로 출력되어야 하며, 방위각별로 4개의 트리거 신호를 Fig. 8과 같이 확인하였다.

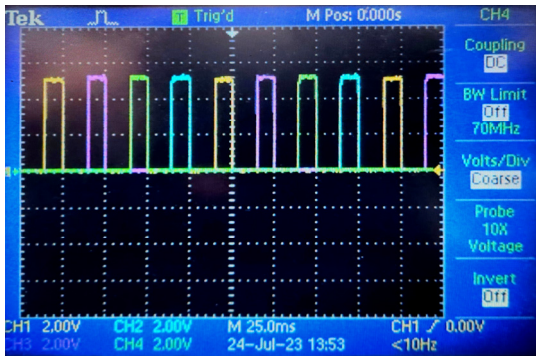


Fig. 8. Hardware trigger output signal by azimuth

두 번째는 동기화 보드를 거치지 않는 카메라의 트리거 소스를 low level로 설정하여 방위각별로 근적외선 카메라로 촬영한 라이다 센서의 적외선 이미지와 동기화 보드를 장착하여 트리거 신호를 발생한 카메라를 방위각별로 근적외선 카메라로 촬영한 이미지를 비교하여 검증하는 방식이다. 첫 번째 방법으로 검증한 트리거 신호가 카메라의 GPIO에 입력되었을 때, 같은 방위각에서 촬영하는지 확인할 수 있다. 트리거 신호가 없는 라이다 센서의 적외선 이미지를 같은 지점에서 촬영했을 때, 스캔 시점이 무작위로 번져 보이는 것을 Fig. 9에서 확인할 수 있다. 반면, 트리거 신호를 카메라에 입력한 이미지는 같은 지점에서 촬영할 때, 스캔하는 방위각 지점과 근적외선 카메라 촬영 시점이 일치하여 Fig. 10과 같이 하나의 점으로 보인다.



Fig. 9. LiDAR picture with a near-infrared camera when the synchronization board is operating

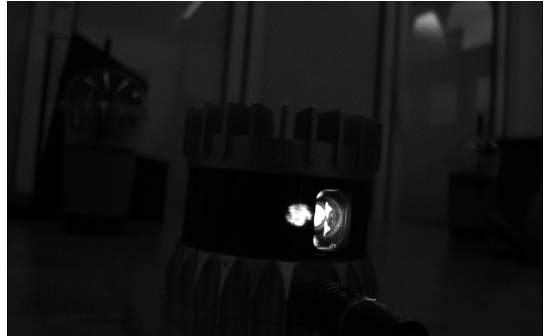


Fig. 10. LiDAR picture with a near-infrared camera when the synchronization board is not working

5. 센서 데이터 구축 시스템 검증

추출한 카메라-라이다 캘리브레이션 내부, 외부 파라미터와 센서 동기화 보드를 포함한 데이터 구축 시스템으로 취득한 데이터를 Fig. 11에 나타냈고, 객체 검출 알고리즘의 학습 데이터로 활용하기 위한 성능 검증을 진행하였다.

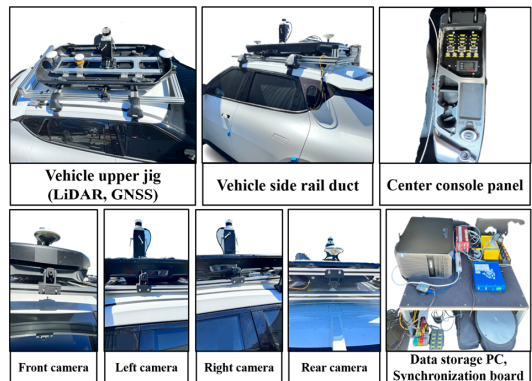


Fig. 11. Data construction system

자율주행 모사 차량에 센서 데이터 구축 시스템을 장착하고, 주행 데이터를 취득하여 분석 도구를 통해 카메라와 라이다 센서의 투영 정도를 확인하였다. 센서 동기화 보드를 사용하지 않고 취득한 데이터는 이기종 센서 간 타임 스탬프의 차이가 있어 Fig. 12와 같이 카메라와 라이다의 프레임이 상이하였다.

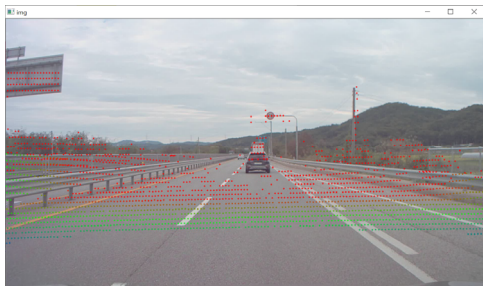


Fig. 12. LiDAR point cloud and camera image comparison

Fig. 13은 이미지에 라이다의 포인트 클라우드를 투영한 결과이다. 자율주행 모사 차량의 속도는 약 64km/h로 주행하였으며, 센서 동기화 보드를 사용하지 않은 경우는 Fig. 13(a)에서 보는 바와 같이 이미지에 포인트 클라우드가 제대로 투영되지 않았고, 두 센서 간 촬영 시점이 다른 것을 확인할 수 있다. Fig. 13(b)에는 센서 동기화



(a) Sensor synchronization board operation



(b) Sensor synchronization board stops

Fig. 13. LiDAR point cloud projection result on image

보드를 통해 트리거 신호를 카메라에 입력하여 취득한 이미지이며, 포인트 클라우드 투영에 틀어지지 않는 것을 확인하였다.

Table 4에 보는 바와 같이 센서 동기화 보드 동작 유무에 따라 카메라-라이다 센서가 입력되는 시간 차이가 존재하는 것을 확인하였다. 입력되는 타임 스탬프는 센서 데이터 출력으로부터 데이터 저장 PC의 인터페이스로 입력되는 지연 시간을 고려하더라도 센서 동기화 보드가 없는 경우는 시간의 표준편차가 크고, 센서 동기화 보드가 있는 경우는 비교적 일정한 차이를 보였다. 타임 스탬프 비교를 위한 주행 샘플 데이터는 약 17분 15초 분량이고, 센서 동기화 보드가 있는 경우 표준편차는 0.012692초, 있는 경우의 표준편차는 0.000606초임을 확인하였다.

Table 4. Time stamp of camera, LiDAR sensor

Statue	Synchronization board operating		Synchronization board stop	
	LiDAR	Camera	LiDAR	Camera
Time [s]	4.195165	4.210686	3.702063	3.704962
	4.295048	4.323741	3.802547	3.804224
	4.395142	4.389021	3.901919	3.904901
	4.496331	4.493581	4.001920	4.003058
	4.594871	4.606955	4.102026	4.100594
	:	:	:	:

6. 결론

본 논문에서는 자율주행차량의 객체 검출을 위한 카메라-라이다 센서의 시각 동기화 성능 검증에 대해 제안하였다. 학습 데이터의 시각 동기화와 카메라-라이다 센서 캘리브레이션으로 내부, 외부 파라미터를 추출하고 주행 데이터를 통해 이미지, 포인트 클라우드와 타임 스탬프를 이용하여 성능을 검증했다. 카메라-라이다 캘리브레이션 결과는 회전 오차: 0.08°, 이동 오차: 0.02m, 재투영 오차: 7.63 픽셀이고, 시각 동기화 보드는 오실로스코프로 방위각별 트리거 신호가 10Hz로 출력되는 것과 근적외선 카메라로 라이다 센서의 적외선을 촬영하여 검증하였다. 자율주행 모사 차량으로 주행 데이터를 취득하였고, 이미지에 포인트 클라우드를 투영하고, 데이터 저장 PC에 입력된 타임 스탬프를 이용하여 센서 동기화 보드의 유무에 따라 비교 검증하였다.

제안한 센서 시각 동기화 방법과 성능 검증은 자율주행차량의 주변 객체 검출에 사용될 것으로 판단된다. 객체의 종류에 따라 안전 지원 기능에 적용할 수 있고, GPS가 차폐된 음영 구간에서 자차 위치를 잃어버렸을 때, 정밀 지도의 속성에 포함된 객체를 인지하여 객체의 거리로부터 자차 위치를 추정할 수 있다. 이기종 센서 동기화를 통해 취득한 데이터로 학습한 객체 검출 알고리즘은 단일 센서의 객체 검출의 한계를 상호 보완할 수 있고, 이동 객체의 속도와 위치추적 정보 취득할 수 있을 것으로 기대된다.

향후, 자율주행차량이 고속 이동 및 도로 상황에 따른 진동이 이미지와 포인트 클라우드에 영향을 미칠 것을 고려하여 관성 측정 장치 센서를 이용한 보정 방식에 관해 연구를 진행할 예정이다. 또한, 구축한 데이터로 인공 지능 학습을 통해 객체 검출 알고리즘을 설계하고 mIoU (mean Intersection over Union)를 통해 객체 검출 성능을 검증하는 연구도 진행할 예정이다.

References

- [1] J. W. Bae, Y. W. Lee, J. H. Koh, J. Y. Lee, J. W. Choi, "Multi-Sensor Calibration Techniques for Camera-LiDAR Sensor Fusion", *The Transactions of the Korean Society Automotive Engineers*, Vol.30, No.5, pp.849-858, 2022. DOI: <https://doi.org/10.7467/KSAE.2022.30.10.849>
- [2] Q. Zhang, R. Pless, "Extrinsic Calibration of a Camera and Laser Range Finder(Improves Camera Calibration)", *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems(IROS)*, Vol.3, Cat. No.04CH37566, pp.2301-2306, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1109/IROS.2004.1389752>
- [3] J. S. Lee, M. G. Kim, H. K. Kim, "Camera and LiDAR Sensor Fusion for Improving Object Detection", *Journal of Broadcast Engineering*, Vol.24, No.5, pp.580-591, 2019. DOI: <https://doi.org/10.5909/JBE.2019.24.4.580>
- [4] E. S. Kim, and S. Y. Park, "Calibration of 3-D Mapping System Consisted of 16-Channel Velodyne LiDAR and 6-Channel Cameras by Matching Multiple 3-D Planes", *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, Vol.20, No.5, pp.363-372, 2020. DOI: <https://doi.org/10.5302/I.ICROS.2020.20.0040>
- [5] G. Vitols, N. Bumanis, I. Arhipova, I. Meirane, "LiDAR and Camera Data for Smart Urban Traffic Monitoring: Challenges of Automated Data Capturing and Synchronization", *ICAI 2021. Communications in Computer and Information Science*, Vol.1455, pp.421-432, 2021. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-89654-6_30

- [6] J. S. Kim, H. G. Yoo, G. H. Gim, H. S. Song, "A High-precision sensor Integration System for a Safe Autonomous Vehicle", *AUTO JOURNAL : Journal of the Korean Society of Automotive Engineers*, Vol.44, No.11, pp.21-25, 2021.
- [7] Gang Xu, and Zhengyou Zhang, pp.316, Kluwer Academic Publishers, 1996, "Epipolar geometry in stereo, motion and object recognition", pp.7-9. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-94-015-8668-9>
- [8] Zhengyou Zhang, "A flexible new technique for camera calibration", *IEEE TRANSACTIONS ON PATTERN ANALYSIS AND MACHINE INTELLIGENCE*, Vol 22, No11, 1330, 2000. DOI: <https://doi.org/10.1109/34.888718>
- [9] Richard I. Hartley, Andrew Zisserman, *Multiple View Geometry*, p.843, Cambridge University Press, 2022, pp.249-267.
- [10] MathWorks, *Lidar Toolbox Reference*, p.812, MathWorks, 2023, pp.14-18.

최 경 수(Kyoung Soo Choi)

[정회원]



- 2017년 2월 : 공주대학교 정보통신공학과 (공학사)
- 2019년 2월 : 공주대학교 일반대학원 정보통신공학과 (공학석사)
- 2023년 3월 ~ 현재 : 공주대학교 일반대학원 정보통신공학과 박사과정
- 2019년 4월 ~ 현재 : 한국자동차연구원 연구원

<관심분야>

차량항법, 정보통신

사 의 환(Yui-Hwan Sa)

[정회원]



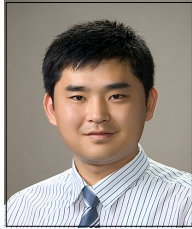
- 2015년 2월 : 청주대학교 전자공학과 (공학사)
- 2017년 2월 : 청주대학교 대학원 전자공학과 (공학석사)
- 2019년 1월 ~ 현재 : 한국자동차연구원 연구원

<관심분야>

자율주행, 인공지능

김 성 진(Sung Jin Kim)

[정회원]



- 1997년 2월 : 원광대학교 전기전자공학과 (공학사)
- 2013년 2월 : 충남대학교 정보통신시스템공학과 (공학석사)
- 2020년 3월 ~ 현재 : 충남대학교 정보통신공학과 (공학박사수료)
- 2005년 3월 ~ 현재 : 한국자동차연구원 연구실장

<관심분야>

복합센서융합 정밀 항법(측위/맵핑/내비게이션)

강 대 수(Dae Soo Kang)

[정회원]



- 1983년 2월 : 경희대학교 전자공학과 (공학사)
- 1985년 2월 : 경희대학교 전자공학과 (공학석사)
- 1992년 2월 : 경희대학교 전자공학과 (공학박사)
- 2005년 3월 ~ 현재 : 공주대학교 정보통신공학과 교수

<관심분야>

디지털통신, 이동통신, 인지신호처리

이 정 욱(Lee Jung Uck)

[정회원]



- 1993년 2월 : 서울대학교 지리학과 (문학사)
- 2018년 2월 : 인하대학교 공간정보공학 (공학석사)
- 2005년 4월 ~ 현재 : 한국자동차연구원 수석연구원

<관심분야>

정보통신, 공간정보