

레이더, 비전, 라이더 융합 기반 자율주행 환경 인지 센서 고장 진단

최승리* · 정용환* · 이명수** · 이경수***

Radar, Vision, Lidar Fusion-based Environment Sensor Fault Detection Algorithm for Automated Vehicles

Seungrhi Choi*, Yonghwan Jeong*, Myungsu Lee**, Kyongsu Yi***

Key Words : Automated Vehicle(자율주행 자동차), Environment Perception System(환경인식시스템), Fault Detection(고장 진단), Safety(안전성)

ABSTRACT

For automated vehicles, the integrity and fault tolerance of environment perception sensor have been an important issue. This paper presents radar, vision, lidar(laser radar) fusion-based fault detection algorithm for autonomous vehicles. In this paper, characteristics of each sensor are shown. And the error of states of moving targets estimated by each sensor is analyzed to present the method to detect fault of environment sensors by characteristic of this error. Each estimation of moving targets is performed by EKF/IMM method. To guarantee the reliability of fault detection algorithm of environment sensor, various driving data in several types of road is analyzed.

1. 서론

자율 주행 시스템은 그 편리성과 사용가치가 널리 인식됨에 따라⁽¹⁾ 최근 몇 년 동안 자동차 분야에서 큰 이슈가 되어 왔고 주행 조향 보조 시스템(LKAS), 능동 안전시스템(ADAS) 등의 부분 자율 주행 기술들로 이미 상용화 되어 도로 위를 달리고 있다.⁽²⁾ 또한 몇몇의 자동차 회사들은 2020년까지 부분적 혹은 특정 조건 하에서의 자율 주행 차량의 상용화를 전망하고 있고, 2040년에는 완전 자율 주행이 가능할 것 더 많은 연구들이 행해지게 되었다. 그 중 일부로 이미 많은 연구자들이 자율 주행 자동차의 센서와 이를

구동하는 액추에이터의 고장 진단과 그에 대한 대처

에 대해 연구하였다.⁽⁴⁾ 자율 주행 자동차는 보통 인지, 판단, 제어 기술로 이루어지는데 이 중 인지에 대한 신뢰성 향상은 충분히 연구 되어지지 않고 있다. 현재 대부분의 자율 주행 자동차는 환경 인지 센서에 의해서 주변을 인식하고 판단하게 된다. 그러나 아직까지 환경 인지 센서의 고장 진단에 대해서는 많은 연구가 행해지지 않고 있고 많은 자율 주행 시스템이 날씨나 충돌에 의한 센서의 뒤틀림에 의해 크게 영향을 받고 있다. 그러나 많은 자동차 회사들이 완전 자율 자동차에 대한 방향성을 잡아감에 따라 환경 인지 센서의 안정성을 확보하는 것이 점점 더 중요해지게 되었다. 뿐만 아니라 현재 이미 상용화 된 많은 시스템들도 환경 인지 센서에 의해 인식된 환경에 대해 고장 안정성이 확보되지 않는다면 그 기능에 많은 영향을 받게 된다. 이미 몇몇의 로봇 공학 분야에서의 이동 로봇에 대해 환경에 대한 신뢰성을 확보하고 자율 이동 메커니즘을 실현 하기 위해 다양한 기법들을 소개하고 있으나,⁽⁵⁾ 자동차에 대

* 서울대학교 기계항공공학부

** 한국교통안전공단

*** 서울대학교 기계항공공학부, 교신저자

E-mail : victory_choi@snu.ac.kr

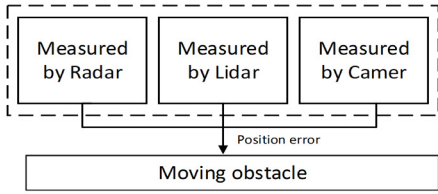


Fig. 1 Overall structure of Radar-Lidar-Camera-fusion-based fault detection algorithm

해서는 많은 연구가 이루어지지 않고 있다. 이동 로봇을 위한 몇몇의 연구에서는 고장 진단을 위해서 모델 기반의 고장 진단 알고리즘, 주파수 영역에서의 고장 진단 등이 소개 되어져 왔다. 그러나 본 논문에서는 환경인지 센서인 레이더(Radar), 카메라(Camera), 라이다(Lidar)의 안정성을 확보하기 위해서 세가지 센서 각각으로 상대 차량을 추정 후 그 위치 추정 오차가 고장 진단 센서를 추정할 수 있게 하였다. 이를 비교하기 위해서 레이더, 카메라, 라이다의 융합 필터의 결과를 이용하였다. 다음 논문에서 상대 차량 추정을 하는 필터에 대해 소개하고 상대 차량 간의 오차 값에 대해 분석하고자 한다.

2. 환경 인식 센서 고장 진단 개요

본 논문에서 제시하는 환경 인식 센서 고장 진단 알고리즘은 레이더, 카메라, 라이다를 이용해 인지 된 대상 중 상대 차량의 위치 추정값을 이용하였다. 상대 차량 위치 추정 오차를 확률 기법을 이용하여 자율 주행 차량의 환경 인지 센서 정상 작동 여부를 판단하고 상대 차량 위치 추정치의 경우 차량의 거동을 다양한 주행을 모사 할 수 있는 주행 모델(Driving Model)을 이용하였다.⁽⁶⁾ 고장 진단을 위한 한계점(Threshold)은 차량 주행 데이터에 의해 만들어졌으며, 오차는 가상의 고장 상황을 가정해서 시뮬레이션 되었다. 본 논문에서는 환경 인지 센서의 고장 진단 방법을 위한 방법으로 3가지 센서를 이용 방법을 제시하는 데에 중점을 두고자 한다(Fig. 1).

3. 상대 차량 추정기

상대 차량 추정을 위해서 레이더, 카메라, 레이더가 이용되었고 세 가지 센서 모두 다음과 같은 차량 주행 모델이 이용되었다.⁽¹⁾

Process Model

$$\dot{x} = a(x_n, u) + q,$$

$$q \sim (0, Q)$$

$$= \begin{bmatrix} v_{TV,rel} \cos \theta - v_{HV} + x_{rel} \cdot \gamma \\ v_{TV,rel} \sin \theta - x_{rel} \cdot \gamma \\ \gamma_n - \gamma \\ a_{rel,x} \\ \dot{\gamma}_n \\ k_a \\ k_{\dot{\gamma}} \end{bmatrix} + q \quad (1)$$

- $v_{TV,rel}$ = 상대 차량의 상대 속도
- v_{HV} = 내차량의 절대 속도
- θ = 상대 차량의 절대 요각도
- x_{rel} = 내차량에서 상대 차량까지의 종방향 거리
- y_{rel} = 내차량에서 상대 차량까지의 횡방향 거리
- γ = 내차량의 절대 요속도
- γ_n = 상대 차량의 절대 요속도
- $a_{rel,x}$ = 상대 차량의 상대 가속도
- $k_a, k_{\dot{\gamma}}$ = p gain

3.1. 차량 소개 및 센서 Configuration

알고리즘 개발을 위한 주행 데이터 취득을 위해 사용한 차량은 K7차량이고 사용한 센서는 Radar, 카메라, Lidar이다(Fig. 2).

3.2. Radar 기반 상대 차량 추정

레이더 기반으로 상대 차량을 추정하기 위해 이용한 Measurement Model은 다음과 같다.

Measurement Model

$$z = \begin{bmatrix} x_{rel} - s_x + m_{n,x} \cos \theta - m_{n,y} \sin \theta \\ y_{rel} - s_y + m_{n,x} \sin \theta - m_{n,y} \cos \theta \\ v_{n,x} \cos \theta - v_{차차} + y_{rel} \cdot \gamma \\ + (m_{n,x} \sin \theta + m_{n,y} \cos \theta)(\gamma - \gamma_n) \end{bmatrix} + v \quad (2)$$

$$v \sim (0, V)$$

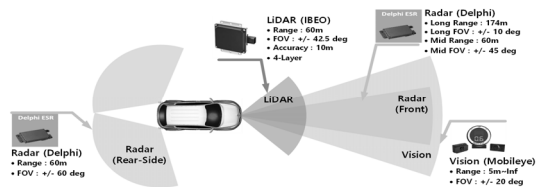


Fig. 2 sensor configuration of K7

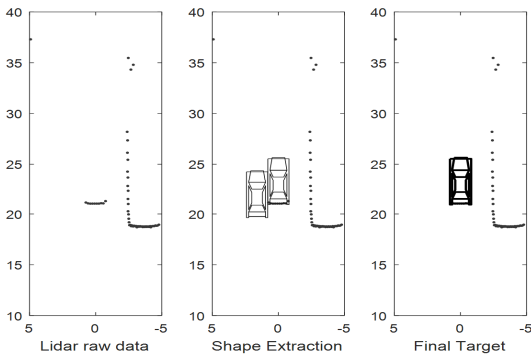


Fig. 3 Three estimation steps by Lidar sensor

3.3. Camera 기반 상대 차량 추정

카메라 기반으로 상대 차량을 추정할 때 레이더와 같은 Measurement Model을 이용하였다.

3.4. Lidar 기반 상대 차량 추정

라이더 기반으로 상대 차량을 추정하기 위해서 차량 모형 모델을 이용하여 shape extraction을 한 뒤 IMM filter를 이용하여 신뢰성을 높였다. 라이더를 이용한 상대 차량 추정은 Fig. 3에서 보는 것과 같이 차량의 모양을 이루는 라이더 포인트들을 추정하고 interactive multiple model filter를 이용하여 정확성을 높였다.

3.5. 각 센서의 특성

서울대학교 교내 주행 데이터를 이용해서 각 센서의 거동을 분석해 보았고 레이더, 라이더, 카메라의 종방향, 횡방향의 센서 특성은 다음과 같다. 레이더 센서는 종방향이 비교적 정확하게 측정이 되었지만 횡방향에서는 좌우로 많이 흔들리는 것을 알 수 있었다. 카메라 값의 경우에 간헐적인 미인지 현상이 발생하고 비교적 정확한 상대 차량의 횡방향 정보를 준다. 라이더의 경우에는 횡/종방향 모두 비교적 정확한 것을 알 수 있었다. 비교 결과를 그래프로 나타내면 아래와 같다.

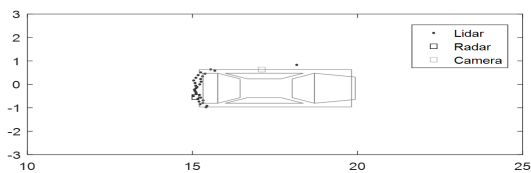


Fig. 4 detection point of sensors: Radar, Camera, and Lidar

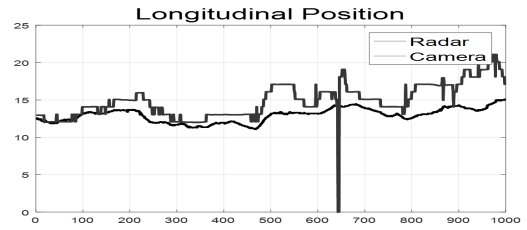


Fig. 5 Longitudinal position of detected object

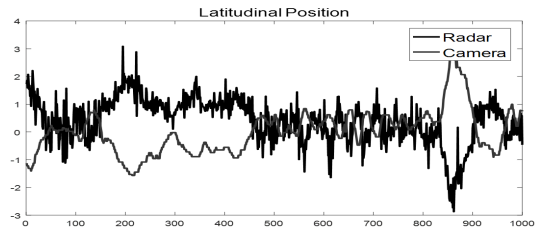


Fig. 6 Lateral position of detected object

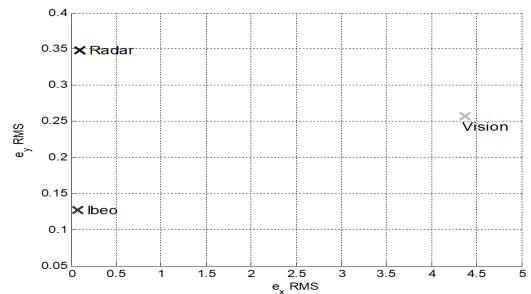


Fig. 7 Analysis on each sensor and their characteristic

4. 주행 데이터 분석

본 논문에서는 상대 차량에 대한 위치 추정 값에 대하여 비교/분석해 보았다.

4.1. 서울대학교 교내 주행 데이터

서울대학교 교내 주행 데이터 중에서 일부를 발췌해서 추정 값을 돌려 보았다. 교내 주행 코스는 약 1.3 km의 일반 2차선 도로로 주행은 매뉴얼 드라이빙으로 앞서 주행하는 차량을 따라 달린다. 주행 코스는 도심 도로 주행과 같은 환경을 가진다.

4.2. 서울대학교 교내 주행 데이터 분석

서울대학교 교내 주행 코스를 이용해서 상대 차량의



Fig. 8 Driving course: Seoul National University



Fig. 9 Front Camera View

추정 위치를 그래프로 내 보았다. 상대 차량의 레이더, 카메라, 그리고 라이더를 이용했을 때 나오는 위치 값을 나타낸 것이다. 각각의 위치 값을 자차량을 기준으로 계산한 상대 위치를 시간에 따라 나타내었다. 각각의 센서로 상대 차량을 추정했을 때 정상 작동 시 각각의 센서로 측정된 상대 차량의 위치 오차가 거의 나지 않는 것을 알 수 있었다.

Fig. 10은 레이더, 카메라, 라이더를 이용한 위치 오차를 차량 좌표 기준으로 x, y 방향으로 나타낸 그래프이다.

Fig. 11은 각각의 센서로 측정된 위치 오차 값을 하나의 그래프로 그려놓고 각 센서 별 특징을 살펴 보았다. 각각의 오차들은 융합 센서를 기준으로 계산 되었다.

계산 된 오차들을 확률 그래프를 통해서 분석해보았다.

Fig. 12와 Fig. 13은 종방향에서 상대 차량의 추정 값들의 오차이다. 이 방법을 이용하면 세 가지 센서 중에 한가지 센서에서 상대 거리와 각도 값에서 부적합한 값이 들어오는 것(biased sensor)을 알아낼 수 있 수 있

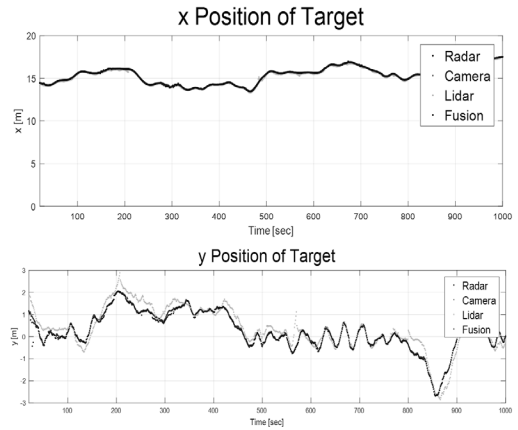


Fig. 9 estimated longitudinal/lateral position

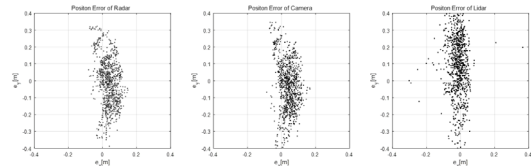


Fig. 10 longitudinal/lateral position error

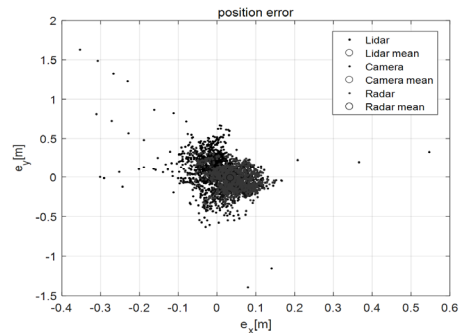


Fig. 11 longitudinal/lateral position error

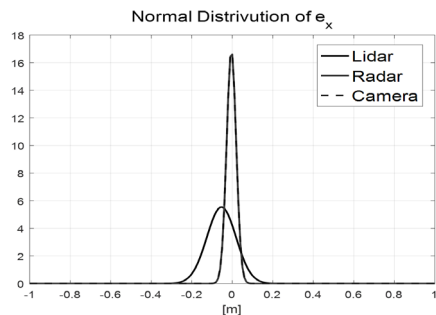


Fig. 12 standard normal distribution of longitudinal position error

Table 1 mean and variance: longitudinal position error

	Mean[m]	Variance
Radar	0.0344	0.0410
Camera	0.0388	0.0411
Lidar	-0.0158	0.0512

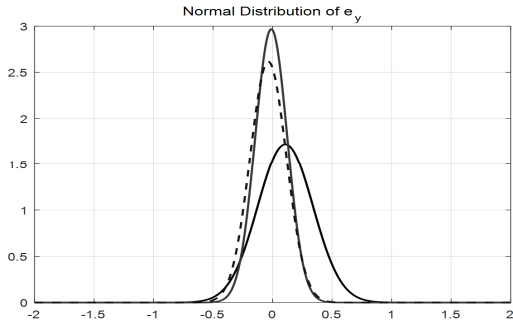


Fig. 13 standard normal distribution of lateral position error

Table 2 mean and variance: lateral position error

	Mean[m]	Variance
Radar	-0.0114	0.1344
Camera	0.1069	0.1524
Lidar	0.1069	0.2320

다. 먼저, 교내 주행 데이터를 분석하여 세 가지 센서 모두 정상 작동하는 상황에서의 오차 값을 분석하여 Table 1과 Table 2의 값을 얻었다. 이후 고장 상황을 가정하여 주행 데이터를 이용하여 시뮬레이션을 해 보았다.

5. 시뮬레이션

본 연구의 시뮬레이션은 동일 환경인 서울대학교 교내 주행 상황에서 행해졌고, 고장 상황을 가정해서 라이더 센서의 거리측정 값에서 5[m]의 오차를 가상으로 두어 시뮬레이션을 진행하였다. 시뮬레이션 결과 레이더, 카메라, 라이더의 융합 필터와 비교하여 오차 값을 비교했을 때 다음과 같다.

융합 필터로 추정된 값과 라이더로 측정된 값 사이의 오차를 계산 하였을 때, 계산된 오차 값의 평균이 Table 3을 통해 약 4.8[m]로 나타난 것을 알 수 있었다.

6. 결론

본 논문에서는 환경 인지 센서의 고장 검출에 대한

Normal Distribution of e_x

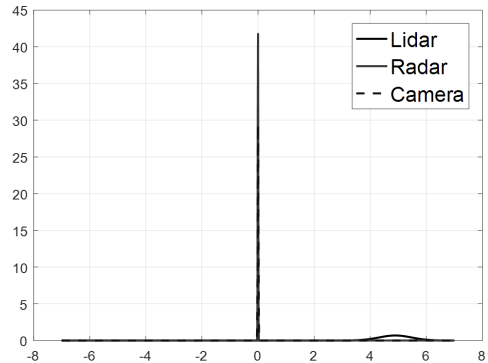


Fig. 14 standard normal distribution of longitudinal position error

Table 3 mean and variance: longitudinal position error

	Mean[m]	Variance
Radar	-0.0018	0.0094
Camera	0.0014	0.0135
Lidar	4.8946	0.5821

Normal Distribution of e_y

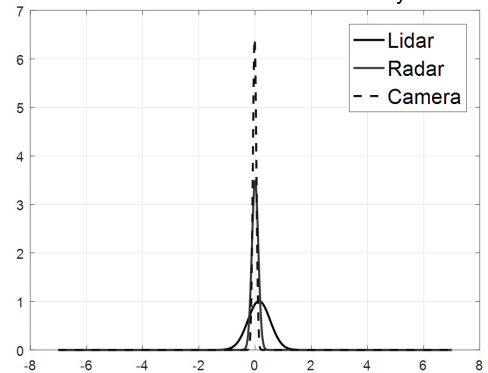


Fig. 15 standard normal distribution of lateral position error

Table 4 mean and variance: lateral position error

	Mean[m]	Variance
Radar	0.1144	0.1144
Camera	-0.0166	0.0621
Lidar	0.1407	0.3958

알고리즘을 제시 하였으며, 본 문제를 새로운 방향으로 접근하는데 그 중점을 두어 새로운 가능성을 보였다. 시뮬레이션을 통해 고장 상황을 가정하여 검증하였지

만 특정 고장 상황 이외 모든 고장 상황에 적용 가능한 것은 아니었고, 오차의 추정 값이 많은 부분에서 필터의 성능에 의존하는 경향이 있었음을 밝힌다. 그러나 본 연구에서 세가지 센서의 추정 값의 오차와 확률 분포를 통해 고장 진단을 하는 방법에 대해 고찰하고 시뮬레이션을 통해 검증하였다. 본 연구는 실제 차량의 적용까지는 더 많은 연구가 필요하지만 자율 주행 차량의 외부 센서에 대한 강건성 확보에 대해 새로운 방법을 제시했다는 데에 그 의의를 둔다.

후 기

본 연구는 국토교통부 및 국토교통과학기술진흥원의 연구비지원(17TLRP-B117133-02)과 BK21 플러스 사업, 서울대학교 정밀기계설계공동연구소(SNU-IAMD)의 연구비 지원으로 수행된 연구임을 밝힙니다.

참고문헌

- (1) Tech. AD, in Annual Conference on Automated Driving, Conference Proceedings, Berlin, Feb 2015
- (2) Automated Driving Roadmap, European Road Transport Research Advisory Council(ERTRAC) (2015)
- (3) "Driveless Car Market Watch", <http://www.driveless-future.com/?p=678>. Accessed April 21, 2017.
- (4) iMobility Forum, Automation in Road Transport, version.
- (5) 정용환, 이경준, 고봉철, 이경수, 2015, "가상 센서 기반 차량센서 고장 대처 알고리즘", 대한기계학회 창립 70주년 기념 학술 대회.
- (6) C. Laugier et al., 2011, "Probabilistic analysis of dynamic scenes and collision risks assessment to improve driving safety," IEEE Intell. Transp. Syst. Mag., Vol. 3, No. 4, pp. 4~19.
- (7) Vachtsevanos, George J., et al., 2006, "Intelligent fault diagnosis and prognosis for engineering system," Hoboken: Wiley.
- (8) H. Ross, 2016, System Engineering in the Product Development, Functional Safety for Road Vehicles: New Challenges and Solutions for E-mobility and automated Driving, pp. 201~215, AG Switzerland: Springer.
- (9) Kim, Beomjun, 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, No.3, pp. 876~889.
- (10) Randell, Brian, 1975, "System structure for software fault tolerance," IEEE Transactions on Software Engineering 2, pp. 220~232.