

자율주행 자동차를 위한 주행 데이터 기반 종방향 제어기 고장 감지 알고리즘 개발

윤영민* · 정용환* · 이종민* · 이경수*[†]

Development of Vehicle Longitudinal Controller Fault Detection Algorithm based on Driving Data for Autonomous Vehicle

Youngmin Yoon*, Yonghwan Jeong*, Jongmin Lee*, Kyongsu Yi*[†]

Key Words : Autonomous driving(자율주행), Fault detection(고장 감지), Residual(잔차), Redundancy(여분), Longitudinal Acceleration(종방향 가속도), Threshold(쓰레시홀드), Process model(프로세스 모델)

ABSTRACT

This paper suggests an algorithm for detecting fault of longitudinal controller in autonomous vehicles. Guaranteeing safety in fault situation is essential because electronic devices in vehicle are dependent each other. Several methods like alarm to driver, ceding control to driver, and emergency stop are considered to cope with fault. This research investigates the fault monitoring process in fail-safe system, for controller which is responsible for accelerating and decelerating control in vehicle. Residual is computed using desired acceleration control command and actual acceleration, and detection of its abnormal increase leads to the decision that system has fault. Before computing residual for controller, health monitoring process of acceleration signal is performed using hardware and analytic redundancy. In fault monitoring process for controller, a process model which is fitted using driving data is considered to improve the performance. This algorithm is simulated via MATLAB tool to verify performance.

1. 서론

자율주행 자동차의 개발 및 자율주행 알고리즘의 고도화는 운전자의 편의와 안전을 보장하며 운전자의 개입을 최소화하는 차량 운전의 목표를 두고 있다. 또한 이는 오늘날 많은 기업들과 대학에서 연구가 이루어지고 있다. 기존에 운전자가 핸들, 스티어링, 브레이크를 직접 조작하는 방식에서, 차량에 탑재된 컴퓨터에서 센서를 이용하여 주변 환경 및 차량 상태를 인지하고 판단 및 제어 명령을 액츄에이터에 인가하는 첨단 기술 방식으로서의 이동으로

기술 개발의 초점이 맞추어지고 있다. 이에 따라 운전자가 자율주행 차량의 구성 요소인 메카트로닉스 장비들에 의존하려는 방향으로 기술 개발이 이루어지고 있으므로, 해당 장비들의 신뢰성 확보가 매우 중요해지고 있다. 따라서 자율주행 자동차 분야에서 고장-안전 전략 관련 연구가 활발히 이루어지고 있다.

고장 진단 분야에서, B. Park는 순환최소자승 기법을 이용하여 모터 시스템의 파라미터를 추정하여 시스템의 고장을 진단하는 연구를 수행하였다.⁽¹⁾ T. Villegas는 주 성분 분석 기법을 이용하여 탱크 시스템에서 고장을 진단하는 시뮬레이션 연구를 수행하였다.⁽²⁾ 허용 제어 분야에서, M. Huzmezan은 항공기의 액츄에이터의 고장 진단 및 거동 예측 기반 고장 허용 제어 알고리즘을 제안하였

* 서울대학교 기계항공공학부

[†]교신 저자, E-mail : kyi@snu.ac.kr

E-mail : dudlass1@snu.ac.kr

다.⁽³⁾ C.P.Tan은 슬라이딩 모드 관측기 기반 센서 고장을 진단 및 신호 재건 알고리즘을 제안하였다.⁽⁴⁾ 자율주행 분야에서도 고장-안전 분야의 연구가 이루어지고 있는데, Y. Jeong은 자율주행 차량의 센서, 액츄에이터 등을 조합하여 관측기 기반 잔차 설계 후 센서와 액츄에이터의 고장 검출 및 분리를 수행하였다.⁽⁵⁾ K.Oh는 슬라이딩 모드 관측기 기반 자율주행 자동차의 조향각, 가속도 신호의 고장 검출 및 신호 재건 알고리즘을 제안하였다.^(6,7) J.Lee는 자율주행 자동차의 고장 발생 시 슬라이딩 모드 기반으로 긴급 정차하는 제어 알고리즘을 제안하였다.⁽⁸⁾

기존 연구들에 이어서, 본 연구에서는 자율주행 차량의 가/감속 제어를 담당하는 종방향 제어기에 대한 고장 진단 알고리즘을 제안하였다. 종방향 제어기의 동역학 시스템 모델이 명확하지 않아, 다양한 주행데이터를 이용하여 기존 연구들에 비하여 계산량이 적은 First order plus dead time(FOPDT)으로 근사하여 제어기 시스템을 모델링하였다. 제안된 알고리즘은 MATLAB 상에서 시뮬레이션으로 성능이 검증되었다. 2장은 제안된 알고리즘의 전체적인 개요, 3장에서는 종방향 제어기의 고장진단을 수행하기 전에 선행되는 종방향 가속도 신호 건전성 검사 알고리즘, 4장에서는 종방향 제어기의 고장 진단 알고리즘의 상세를 다루었다. 이어서 5장에서는 성능 평가를 위한 시뮬레이션 시행 결과 및 분석을 다루었고, 6장에서는 결론 및 향후 연구 계획을 다루었다.

2. 전체 알고리즘 구성

본 연구에서 사용된 차량은 현대자동차 IONIQ으로, 자율주행을 수행하기 위하여 차량을 개조하여 레이저 스캐너, 카메라, GPS/IMU 등의 센서와 오토박스, 컴퓨터,

MDPS 및 ESC 모듈 등을 장착하였고, 내부 통신 네트워크를 구성하였다.

본 차량은 제어기에 목표 가속도 입력을 가하여 종방향 가/감속 제어가 이루어지며, 본 논문에서의 종방향 제어기의 고장 진단 알고리즘은 차량의 실제 가속도가 목표 가속도 입력을 잘 추종하는지 검사한다. 정상 상태에서의 목표 가속도 입력과 실제 가속도 사이의 프로세스 모델을 구성하여, 목표 가속도 입력을 프로세스 모델에 대입하여 출력된 신호와 실제 가속도 신호를 이용하여 구성된 잔차의 쓰레시홀드 초과 여부를 검사한다.

종방향 제어기 검사를 수행하기에 앞서, 검사에 사용되는 실제 가속도 신호가 정상임을 보장하기 위하여 가속도 신호의 건전성 검사가 선행된다. 실제 가속도 신호 검사의 경우 사시 가속도계 신호, GPS 내장 가속도계 신호, 그리고 추정된 가속도 신호의 세 가지 신호 정보를 이용하여 세 개의 잔차를 구성한다. 추정된 가속도 신호의 경우 요속도계 및 휠속도계를 이용하여 칼만 필터로 추정된 신호이다. 따라서 쓰레시홀드를 초과하는 잔차를 파악하여 세 가지 가속도 신호 중 문제가 있는 신호를 찾아내고, 종방향 제어기 고장에 사용할 실제 가속도 신호를 선정한다. 전체 알고리즘 구성은 Fig. 1에 나타내었다.

3. 실제 가속도 신호 건전성 검사

3.1. 칼만 필터 기반 추정 가속도 신호 생성

본 연구에서 사용된 차량에서 가속도 신호를 직접 출력하는 센서는 사시 가속도계와 GPS 내장 가속도계의 두 가지이다. 두 가지 신호만으로 여분을 구성할 경우 신호의 고장 검출 및 분리가 불가능하므로, 추가적인 가속도

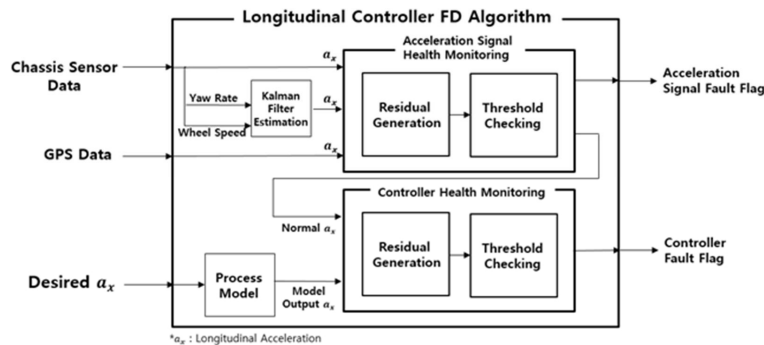


Fig. 1 Outline of vehicle longitudinal controller fault detection algorithm

신호를 생성하여 여분에 포함시키도록 하였다. 요 속도계와 휠 속도계를 이용하여 측정된 신호로 칼만 필터를 구성하여 가속도 신호를 추정하여 여분에 포함시켰다. 칼만 필터의 시스템 모델은 식 (1)과 같이 전개하였다.

$$\begin{aligned}
 x[k+1] &= Ax[k] + w[k] \\
 \text{with } x[k] &= [v_x[k] \quad \gamma[k] \quad a[k] \quad \dot{\gamma}[k]]^T \\
 A &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & T & 0 \\ 0 & 1 & 0 & T \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)
 \end{aligned}$$

$x[k]$ 는 차량의 상태를 나타내는 이산 상태변수, $w[k]$ 는 Gaussian 잡음 변수이며, T 는 샘플링 시간이다. v_x 는 차량 속력, γ 는 차량 요속도, a 는 차량 중방향 가속도, 그리고 $\dot{\gamma}$ 는 차량 요가속도를 나타낸다. 칼만 필터의 측정 모델은 식 (2)와 같이 전개하였다.

$$\begin{aligned}
 z[k] &= h(x[k]) + v[k] \quad \text{with} \\
 z[k] &= [v_{m,RL}[k] \quad v_{m,RR}[k] \quad \gamma_m[k] \quad v_{m,FL}[k] \quad v_{m,FR}[k]]^T \\
 h(x[k]) &= \begin{bmatrix} v_x[k] - L\gamma[k] \\ v_x[k] + L\gamma[k] \\ \gamma[k] \\ \sqrt{(v_x[k] - 0.8\gamma[k])^2 + (L\gamma[k])^2} \\ \sqrt{(v_x[k] + 0.8\gamma[k])^2 + (L\gamma[k])^2} \end{bmatrix} \quad (2)
 \end{aligned}$$

$z[k]$ 는 차량 측정치를 나타내는 이산 상태변수이고, $v[k]$ 는 Gaussian 잡음 변수이다. $v_{m,RL}$, $v_{m,RR}$, $v_{m,FL}$, $v_{m,FR}$ 는 각각 좌측 후륜 휠속도, 우측 후륜 휠속도, 좌측 전륜 휠속도, 우측 전륜 휠속도 측정값이며, L 은 차량 축간거리이다.

3.2. 가속도 신호 잡음 특성 분석

가속도 신호들을 이용하여 구성된 잔차의 쓰레시홀드를 설정하기 위하여 신호들의 잡음 특성을 분석하였다. 목표 가속도 입력을 스텝 입력으로 가한 후, 실제 가속도

Table 1 Standard deviation of acceleration signal noise (m/s^2)

	$a_{x,des} = 0.5m/s^2$	$a_{x,des} = 1.0m/s^2$	$a_{x,des} = 1.5m/s^2$
Chassis Acceleration	0.0357	0.0466	0.0655
GPS Acceleration	0.1297	0.1043	0.1501
Estimated Acceleration	0.1635	0.2010	0.2828

신호에서 목표 가속도 스텝 입력 값을 뺀 에러값의 표준편차를 신호 잡음의 표준편차로 가정하였다. 조사된 표준편차는 Table 1에 나타내었다. $a_{x,des}$ 는 목표 가속도 스텝 입력의 크기를 나타낸다.

3.3. 잔차 구성 및 쓰레시홀드 설정

가속도 신호의 고장 판단은 사시 가속도계 신호, GPS 내장 가속도계 신호, 그리고 요속도계 및 휠속도계 기반 추정 가속도 신호를 이용하여 구성된 세 개의 잔차와 각 잔차의 쓰레시홀드를 비교하면서 수행된다. 잔차 구성 및 쓰레시홀드 설정은 Table 2에 나타내었다.

Table 2 Configuration of residuals and thresholds

Residuals	Sensors Involved	Thresholds
$r_1 = a_{x,chassis} - a_{x,GPS} $	Chassis accelerometer, GPS accelerometer	$4\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}$
$r_2 = a_{x,GPS} - a_{x,esti} $	GPS accelerometer, Yaw-rate sensor, Wheel speed sensor	$4\sqrt{\sigma_2^2 + \sigma_3^2}$
$r_3 = a_{x,esti} - a_{x,chassis} $	Chassis accelerometer, Yaw-rate sensor, Wheel speed sensor	$4\sqrt{\sigma_3^2 + \sigma_1^2}$

$a_{x,chassis}$ 는 사시 가속도계에서 측정된 가속도 신호값, $a_{x,GPS}$ 는 GPS 내장 가속도계에서 측정된 가속도 신호값, 그리고 $a_{x,esti}$ 는 요속도계 및 휠속도계 측정값으로부터 추정된 가속도 신호값이다. $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 는 각각 사시 가속도계 측정 가속도, GPS 내장 가속도계 측정 가속도, 그리고 요속도계 및 휠속도계 기반 추정 가속도의 잡음 표준편차의 최댓값이다.

통계적으로 도출된 가속도 신호들의 잡음을 서로 독립인 White noise로 가정하여, 현재 잔차가 신뢰도 99.99% 구간 내(4σ 이내)에 존재하면 해당 잔차를 구성하는 신호들은 정상이라고 가정한다. 1초마다 잔차 신호의 상태를 점검하여 1초 동안 쓰레시홀드를 초과하는 신호의 비중이 60% 이상인 잔차에 대하여 오류가 있다고 간주하고, 신호의 고장 검출 및 분리가 이루어진다.

4. 차량 중방향 제어기 고장 진단

중방향 제어기를 포함한 차량 시스템은 중방향 가/감

속 제어 관점으로 보았을 때 목표 가속도를 입력으로 하고 실제 가속도를 출력으로 하는 시스템으로 간주할 수 있다. 따라서 해당 시스템에 대한 프로세스 모델을 구성하여 목표 가속도 입력을 프로세스 모델에 대입하여 출력된 신호와 실제 가속도 신호를 비교하여 고장 진단을 수행하고자 하였다. 해당 알고리즘의 구성은 Fig. 2에 나타내었다.

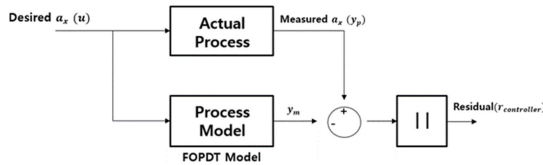


Fig. 2 Fault detection of vehicle longitudinal controller

4.1. 프로세스 모델 구성

프로세스 모델로는 정상 상태에서의 목표 가속도 입력과 실제 가속도 신호 사이의 전달함수를 FOPDT 모델로 근사하여 사용하고자 하였다. FOPDT 모델의 파라미터들은 실제 시험 차량에 목표 가속도를 Step 입력 혹은 Ramp 입력으로 가하여 얻은 실제 주행 데이터를 이용하여 도출하였다.

4.2. 잔차 구성 및 쓰레시홀드 설정

차량 종방향 제어기의 고장 판단은 목표 가속도 값을 프로세스 모델에 대입하여 나온 모델 출력 값과 실제 가속도 값의 차이를 이용하여 구성된 잔차와 쓰레시홀드를 비교함으로써 수행된다. 종방향 제어기의 잔차와 쓰레시홀드는 식 (3)과 같이 구성하였다.

$$r_{controller} = |y_p - y_m| \quad (3)$$

$$\text{Threshold} = 4\sigma_{\text{Measured } Ax} + \sum_{k=0}^4 b_k |a_{x,cmd}(t-kT)|$$

y_p 는 실제 가속도값, y_m 는 목표 가속도를 프로세스 모델에 대입하여 도출된 신호이다. $\sigma_{\text{Measured } Ax}$ 는 가속도 신호 건전성 검사에서 정상으로 판정된 가속도 신호의 잡음 표준편차로, 가속도 신호 종류의 우선 순위는 요속도계 및 휠속도계 기반 추정가속도값, GPS 내장 가속도계 신호값, 샤시 가속도계 신호값 순이다. $a_{x,cmd}$ 는 목표 가속도값, b_k 는 상수 파라미터, T 는 샘플링 타임을 의미

한다.

쓰레시홀드는 잔차에 포함된 실제 가속도 신호의 잡음 특성과 목표 가속도값에 따른 잔차 변화를 고려하여 적응형으로 설계되었다. 따라서 고장진단 알고리즘은 1초마다 잔차의 신호 상태를 점검하여 1초 동안 쓰레시홀드를 초과하는 신호의 비중이 60% 이상이면 종방향 제어기의 성능에 오류가 있다고 판단한다.

5. 시뮬레이션 결과

본 연구에서 제안된 차량 종방향 제어기의 고장 진단 알고리즘은 오프라인 시뮬레이션을 통하여 검증되었다. 실차 주행 데이터 기반으로 고장 주입 시뮬레이션을 진행하였으며, 잔차가 고장 상황을 충분히 반영하였는지 확인하였다.

5.1. 가속도 신호 고장 시뮬레이션

샤시 가속도계에 Bias 결함을 주입한 시뮬레이션 결과를 Fig. 3에 도시하였다. 16초에 샤시 가속도계에 주입된

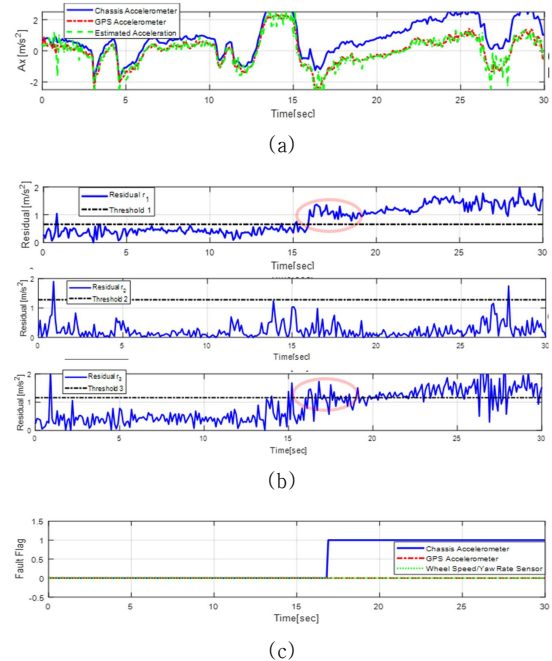


Fig. 3 Simulation result of acceleration signal fault detection algorithm. (a) Measurement and estimates of acceleration (b) Residuals (r_1 , r_2 , r_3) and thresholds (c) Fault detection result

결함에 대응하여 관련된 잔차 신호가 쓰레시홀드를 초과하여 17초에 결함 표시가 이루어진 것을 확인할 수 있다. 1초 부근에 신호 잡음에 의하여 잔차가 쓰레시홀드를 초과하는 상황이 발견되었으나 해당 구간에서 1초 동안 쓰레시홀드를 초과하는 잔차 신호의 비중이 60% 미만으로 결함 표시가 이루어지지 않았다.

5.2. 종방향 제어기 신호 고장 시뮬레이션

종방향 제어기에 결함을 주입한 시뮬레이션 결과를 Fig. 4에 도시하였다. 14초에 종방향 제어기에 주입된 결함에 대응하여 잔차가 쓰레시홀드를 초과하여 15초에 결함 표시가 이루어진 것을 확인할 수 있다. 목표 가속도 입력의 급격한 증감에 대응하여 적응형 쓰레시홀드가 변화하는 것을 알 수 있다.

제어기의 시스템 특성을 고려하여 도입한 프로세스 모

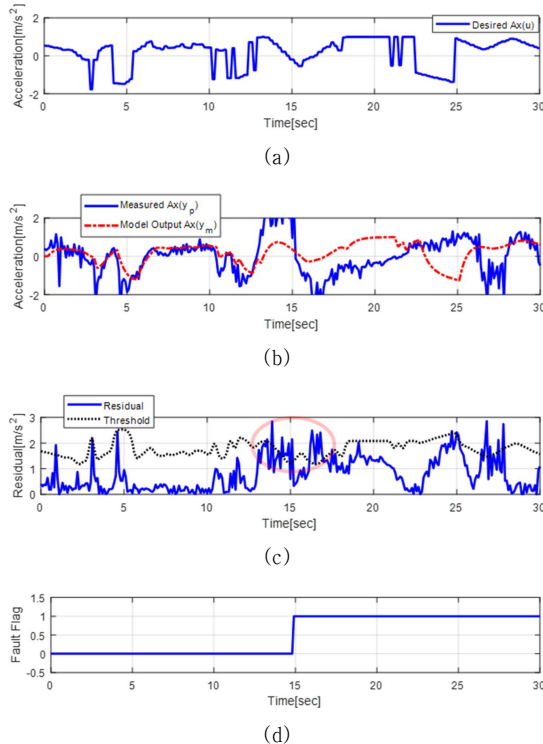


Fig. 4 Simulation result of vehicle longitudinal controller fault detection algorithm. (a) Desired acceleration (b) Measured acceleration and process model output acceleration (c) Residual ($r_{controller}$) and threshold (d) Fault detection result

델 사용의 고장 진단 성능 향상 검증을 위하여 프로세스 모델을 사용하지 않은 경우와 성능을 비교하였다. 단순히 목표 가속도와 실제 가속도 값을 이용하여 잔차를 구성한 경우 Fig. 5에서 확인할 수 있듯이 목표 가속도가 급격하게 변화하는 구간에서 잔차에 피크가 발생한다. 이러한 현상이 반복될 때 가짜 결함 표시가 발생할 수 있다. 따라서 종방향 제어기의 고장 진단 알고리즘에서 제안된 프로세스 모델의 도입이 고장 진단 성능에 긍정적으로 작용할 수 있다.

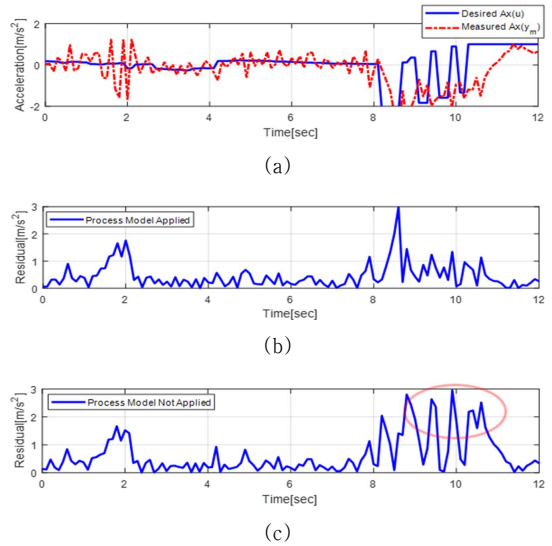


Fig. 5 Simulation result of vehicle longitudinal controller fault detection algorithm - comparison with algorithm without process model (a) Desired acceleration and measured acceleration (b) Residual with process model (c) Residual without process model

6. 결론

본 연구에서는 프로세스 모델을 이용하여 차량 종방향 제어기의 고장진단을 수행하는 알고리즘을 제시하였으며, 그와 동시에 하드웨어적 및 분석적 여분을 이용하여 종방향 제어기의 고장진단과 관련된 가속도 측정 신호의 건전성을 확인하는 방법도 제시하였다. 결함 주입 시뮬레이션 결과, 결함 주입에 대응하여 결함 표시가 발생하는 것을 확인하였고, 프로세스 모델의 도입이 고장 진단 성능 향상에 기여함을 확인하였다.

신호의 잡음 및 목표 가속도의 급격한 변화 등에 의한 잔차의 쓰레시홀드 초과 현상은 개선해야 할 점으로 보이

며, 실차 적용을 위한 프로세스 모델의 이산화 및 파라미터 보정 등을 향후 진행할 계획이다.

후 기

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

참고문헌

- (1) Park, Byoung-Gun, Rae-Young Kim, and Dong-Seok Hyun, "Fault diagnosis using recursive least square algorithm for permanent magnet synchronous motor drives", *ICPE (ISPE) 논문집* (2011): 2506~2510.
- (2) Villegas, Thamara, María Jesús Fuente, and Miguel Rodríguez, "Principal component analysis for fault detection and diagnosis. experience with a pilot plant", *CIMMACS'10 Proceedings of the 9th WSEAS international conference on computational intelligence, man-machine systems and cybernetics*. 2010.
- (3) Huzmezan, M., and J. M. Maciejowski, "Reconfigurable flight control during actuator failures using predictive control", *IFAC Proceedings Volumes* 32.2 (1999): 7979~7984.
- (4) Tan, Chee Pin, and Christopher Edwards, "Sliding mode observers for detection and reconstruction of sensor faults", *Automatica* 38.10 (2002): 1815~1821.
- (5) Jeong, Yonghwan, et al., "Vehicle sensor and actuator fault detection algorithm for automated vehicles", *Intelligent Vehicles Symposium (IV), 2015 IEEE*. IEEE, 2015.
- (6) 오광석, 이경수, "슬라이딩 모드 관측기를 이용한 자율주행 자동차의 모델 기반 고장 검출 및 강건 조향 제어 알고리즘", *한국자동차공학회논문집* 25.6 (2017): 732~741.
- (7) Oh, Kwangseok, and Kyongsu Yi, "A Longitudinal Model Based Probabilistic Fault Diagnosis Algorithm of Autonomous Vehicles Using Sliding Mode Observer", *ASME 2017 Conference on Information Storage and Processing Systems collocated with the ASME 2017 Conference on Information Storage and Processing Systems*. American Society of Mechanical Engineers, 2017.
- (8) 이종민, 오광석, 이경수, "자율주행 차량의 고장 진단 및 슬라이딩 모드 기반 긴급제동 제어 전략", *대한기계학회 춘추학술대회* (2018): 28~29.
- (9) Nah, J., and W. G. Kim, "Failsafe Control Algorithm for an Autonomous Vehicle", *Seoul National Univ.* (2010).
- (10) Rajamani, Rajesh, et al., "A complete fault diagnostic system for automated vehicles operating in a platoon", *IEEE transactions on control systems technology* 9.4 (2001): 553~564.