

차량 주행안정성 제어시스템의 자동안전 로직

민경찬[†] · 이건복* · 이경수**

(2004년 4월 21일 접수, 2004년 9월 20일 심사완료)

Failsafe Logic for a Vehicle Stability Control System

Kyongchan Min, Gunbok Lee and Kyongsu Yi

Key Words : Fault Detection(고장진단), ESP(차량안정성제어), Residual(레지듀얼), Threshold(기준값)

Abstract

This paper describes the fault detection and failsafe logic to be used in an Electronic Stability Program (ESP). The aim of this paper is to prevent of erroneous controls in the ESP. Developed this paper introduces the fault detection logic and evaluation of residual signals. The failsafe logic consists of four redundant sub-models, which can be used for detecting the faults in various sensors (yaw rate, lateral acceleration, steering wheel angle). We present two mathematical residual generation methods : one is a method using the average value and the other is a method using the minimum value of the each residual. We verified a failsafe logic developed using vehicle test results also we compare vehicle model based simulation results with test vehicle results.

기호설명

- $\dot{\gamma}$: yaw 변화율(radian/s)
- a_y : 횡방향 가속도(m/s²)
- δ : 조향각(radian)
- d : 트랙 거리(m)
- l : 전후륜간 거리(m)
- v_{ch} : 차량특성속도(m/s)
- $C_{\alpha f,r}$: 전,후륜 회전강성(N/radian)
- $v_{fl,r}$: 전륜 좌우측 휠속도(m/s)
- $v_{rl,r}$: 후륜 좌우측 휠속도(m/s)
- r : 레지듀얼
- J_{Th} : 기준값

1. 서론

차량 안정성 제어기(Electronic stability program)란 차량의 제동계 및 구동계를 직접 제어하여 차량이 저마찰 노면이나 비대칭 노면을 주행할 때 급조향 및 급제동으로 발생할 수 있는 차량의 회전 현상이나 전복현상을 방지하여 안전주행을 보장해주는 시스템이다. 이 같은 ESP는 휠각속도 센서, 요속도 센서, 조향각 센서, 횡방향가속도 센서 등에서 측정된 신호를 이용해서 계산된 제어 목표값을 바탕으로 차량을 제어하게 된다.

따라서, 센서의 고장 등으로 인해 센서신호가 부정확한 값을 출력하게 될 경우 시스템의 안정성에 큰 문제를 야기하게 되고, 운전자와 차량의 안전에 직접적인 영향을 미치게 된다. 또한, 최근 제어시스템의 복잡화와 자동화로 시스템의 규모가 커지면서 센서 및 작동기의 고장 요인과 발생빈도가 증가하게 되었고 제어시스템의 신뢰성과 안정성의 확보 측면에서 시스템의 고장진단이 중요한 문제로 대두되었다.

고장진단을 위한 대표적인 두 가지의 방법으로는 동일한 센서를 중복해서 사용하는 방법

* 회원, 한양대학교 자동차공학과

* 회원, 숭실대학교 기계공학부

[†] 책임저자, 회원, 한양대학교 기계공학부

E-mail : kyongsu@hanyang.ac.kr

TEL : (02)2290-0455 FAX : (02)2296-0561

(Physical redundancy)과 물리적 모델을 기반으로 하여서 고장을 감지하는(Model-based fault detection)이 있다. 전자는 기본적으로 하나의 값을 측정하는데 있어서 여러 개의 센서를 사용해서 고장진단을 하는 방법으로 제품의 원가 상승요인을 제공하게 된다. 후자는 해석적인 중복구조(Analytical redundancy)를 바탕으로 고장을 진단하는 방법을 말한다. 시스템이 다른 상태와 기능적인 관계를 사용하여 변수측정이 가능하다면 우리는 그 시스템을 해석적인 중복구조를 갖는다고 말한다. 본 논문은 이러한 해석적인 중복구조를 이용해서 센서의 중복 사용없이 센서의 고장을 진단하는 자동안전 로직을 개발하는데 그 목적이 있다.⁽¹⁾

2. 시뮬레이션 차량모델 제작 및 검증

2.1 차체 및 현가장치모델

Fig. 1 과 같이 x, y, z 방향 직선운동과 롤(roll), 피치(pitch), 요(yaw) 방향의 회전운동을 고려한 차체모델을 사용하였다. 현가장치는 1/4 차량모델로 각각의 휠에 고려하였고, 차체의 회전운동 및 노면입력에 따라 상태변수가 계산된다. 맵을 이용하여 전륜의 슬립각 및 하중에 따른 복원토크를 고려하였다.

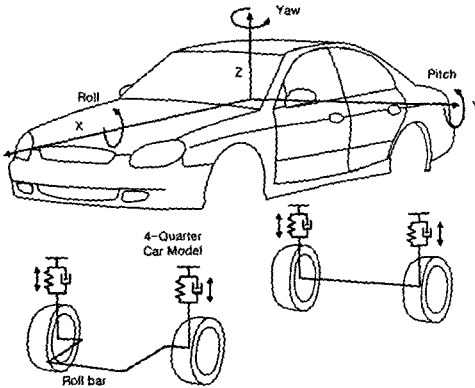


Fig. 1 3-D Vehicle dynamic model

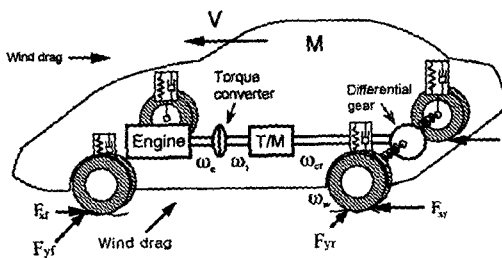


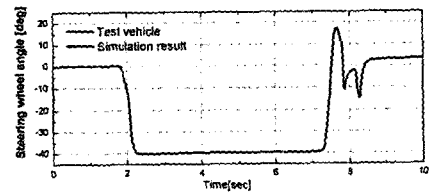
Fig. 2 Drivetrain model

2.2 구동계 모델

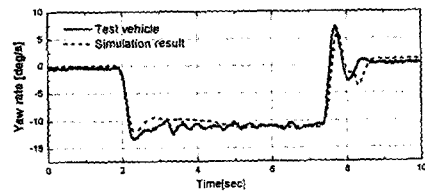
구동축은 선형스프링으로 가정하여 구동토크를 구했으며, 타이어 모델은 Pacejka 모델⁽²⁾을 적용하였고 종방향 및 횡방향 타이어 힘은 차체모델과 현가장치 모델로부터 산출된 각 차륜의 슬립률과 슬립각에 근거하여 계산했다. 또한, 복합 타이어모델을 채택하여 종방향과 횡방향 힘 모두 슬립률과 슬립각 모두에 종속되도록 모델을 구성하였다.

차동기어는 좌우의 구동륜에 같은 토크를 분배하는 장치로써, 직진시나 미소한 선회시는 큰 영향을 끼치지 않으나 과도한 조향이나 임계주행상황에서는 차량거동에 큰 영향을 줄 수 있다. 그러므로 정확한 좌우 토크를 계산하기 위해 섰 기어(Sun gear) 및 링기어(Ring gear) 각속도의 운동방정식을 고려하여 모델링하였다.

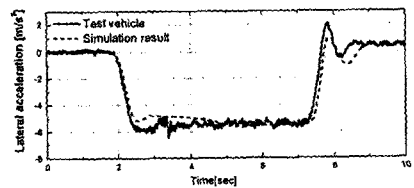
2.3 실차실험을 통한 시뮬레이션 차량모델 검증
시뮬레이션 차량모델을 사용하여 얻은 결과와 실차실험으로부터 얻은 결과를 비교검증하였다.



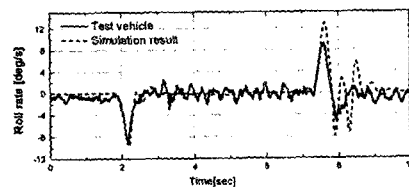
(a) Steering wheel angle



(b) Yaw rate



(c) Lateral acceleration



(d) Roll rate

Fig. 3 Step steer test

차량실험을 통해서 얻은 운동변수는 차량의 전체적인 안정성 판별에 큰 영향을 미칠 수 있는 종방향속도, 횡방향가속도, 요속도, 롤속도이며 이들 변수 측정에 사용된 센서는 광학 속도계, 자이로 스코프(yaw rate sensor), 가속도 센서 및 조향각 센서이다.

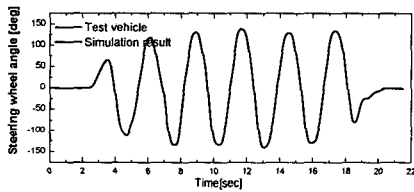
동일한 조건에서의 상호 비교를 위해 3 차원 차량모델의 종방향 속도는 실험차량의 종방향 속도를 지능형 순항 제어(Intelligent Cruise Control, ICC)의 알고리즘⁽³⁾을 사용하여 추종하였고, 조향각은 실험차량의 결과를 그대로 입력으로 사용하였다.

2.3.1 스텝조향시험(Step Test)

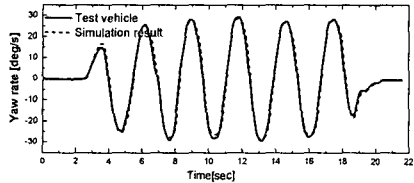
종방향 속도를 100kph 로 유지하고 운전자조향각을 40deg 로 유지하며 주행실험한 결과를 Fig. 3 에 나타내었다.

2.3.2 슬라롬조향시험(Slalom Test)

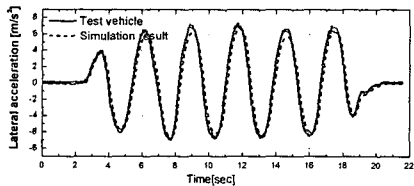
차량의 종방향속도를 50kph 로 유지하며 주행실험한 결과를 Fig. 4 에 나타내었다.



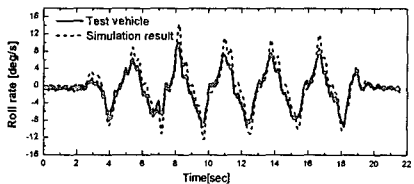
(a) Steering wheel angle



(b) Yaw rate



(c) Lateral acceleration



(d) Roll rate

Fig. 4 Slalom test

3. 고장진단

3.1 기본로직

Fig. 5 에 자동안전 로직을 도시하였다. 요속도, 횡방향가속도, 조향각, 휠속도를 이용하여 차량 안정성 제어기에서 사용되는 센서 신호인 요속도, 횡방향가속도, 조향각에 해당하는 하위모델의 변수추종을 하게 된다. 총 12 개의 하위모델에서 계산된 신호는 차량의 주행상태에 따라서 정상상태(Steady behavior)와 과도상태(Unsteady behavior)로 나눠 레지듀얼을 계산하게 되고, 주행상태에 따라서 설정된 기준값 이상의 값이 나오게되면 시스템의 고장을 선언하게 된다.⁽⁴⁾ 시스템의 고장이 선언되면 차량 안정성 제어기의 동작을 정지시킴으로써 차량 안정성 제어기의 오작동을 막게 된다.

Table 1 Sub-model

Model Y1	$\dot{\gamma} = \frac{v_{fr} - v_{fl}}{d}$
Model Y2	$\dot{\gamma} = \frac{v_{rr} - v_{rl}}{d}$
Model Y3	$\dot{\gamma} = \frac{a_y}{v_{ref}}$
Model Y4	$\dot{\gamma} = \frac{\delta \cdot v_{ref}}{i_L l \left(1 + \left(\frac{v_{ref}}{v_{ch}}\right)^2\right)}$
Model A1	$a_y = v_{ref} \frac{v_{fr} - v_{fl}}{d}$
Model A2	$a_y = v_{ref} \frac{v_{rr} - v_{rl}}{d}$
Model A3	$a_y = v_{ref} \cdot \dot{\gamma}$
Model A4	$a_y = \frac{\delta \cdot v_{ref}^2}{i_L l \left(1 + \left(\frac{v_{ref}}{v_{ch}}\right)^2\right)}$
Model S1	$\delta = \frac{i_L l}{v_{ref}} \left(1 + \left(\frac{v_{ref}}{v_{ch}}\right)^2\right) \left(\frac{v_{fr} - v_{fl}}{d}\right)$
Model S2	$\delta = \frac{i_L l}{v_{ref}} \left(1 + \left(\frac{v_{ref}}{v_{ch}}\right)^2\right) \left(\frac{v_{rr} - v_{rl}}{d}\right)$
Model S3	$\delta = \frac{i_L l}{v_{ref}} \left(1 + \left(\frac{v_{ref}}{v_{ch}}\right)^2\right) \dot{\gamma}$
Model S4	$\delta = \frac{i_L l}{v_{ref}} \left(1 + \left(\frac{v_{ref}}{v_{ch}}\right)^2\right) a_y$

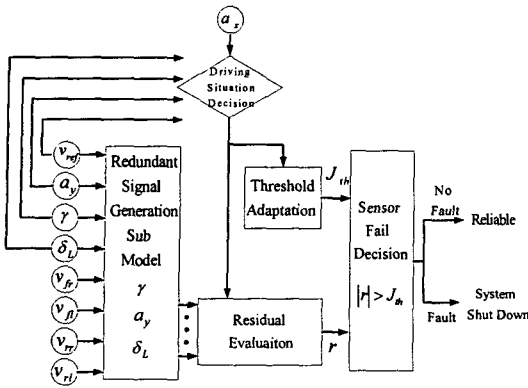


Fig. 5 Failsafe logic

3.2 하위모델

해당 신호의 변수추종을 위해서 휠각속도, 요속도, 횡가속도, 조향각을 이용해서 Table 1 과 같이 요속도, 횡방향가속도, 조향각의 하위모델을 정의하였다.

3.3 레지듀얼 계산

일반적으로 센서모델은 다음과 같이 수학적 함수와 표현이 불가능한 모델 불확실성으로 나타낼 수 있다.

$$y = f(u_{i1}, \dots, u_{im}) + \Delta, PS \in \Omega. \quad (1)$$

하위모델 함수 $f_i(u_{ij}, \dots, u_{ij})$ 이 주행상황에 따라 유효한 값을 나타내는 범위 Ω 에 속하게되면 모델 불확실성 Δ 의 크기는 상대적으로 줄어들게 되므로, 각 하위모델의 오차는 줄어들게 된다. 본 논문에서는 이러한 주행상황을 기준으로 차량의 거동을 정상상태와 과도상태로 나눠서 레지듀얼을 계산하였다.⁽⁵⁻⁷⁾

3.3.1 정상상태 주행

정상상태 구간에서는 다음과 같이 평균값을 이용해서 레지듀얼을 계산한다.

① 각 하위모델과 센서 출력신호의 평균값 \bar{y} 을 구한다.

$$\bar{y} = \frac{1}{n+1} (\sum_{i=1}^n \hat{y}_i + \hat{y}_{n+1}), y = \hat{y}_{n+1}. \quad (2)$$

② \bar{y} 와 각 하위모델간의 차 $|\bar{y} - \hat{y}_i|, i=1, \dots, n+1$ 를 구해서 다음의 조건을 만족하는 $\hat{y}_{i1}, \hat{y}_{i2}, \hat{y}_{i3}$ 를 구한다.

$$|\bar{y} - \hat{y}_{i1}|, |\bar{y} - \hat{y}_{i2}|, |\bar{y} - \hat{y}_{i3}| < |\bar{y} - \hat{y}_j|, \quad (3)$$

$$j \neq i, i, 2, 3, j \in \{1, \dots, n+1\}.$$

③ 위에서 구해진 세개 신호의 중간값과 센서로부터 측정된 y 와의 차를 정상상태에서의 최종 레지듀얼로 한다.

$$r = y - \hat{y}_{i2}, \quad \hat{y}_{i1} \leq \hat{y}_{i2} \leq \hat{y}_{i3}. \quad (4)$$

3.3.2 과도상태 주행

과도상태 구간에서는 모델 불확실성이 지배적으로 작용하게 되고, 하위모델의 오차가 커지게 된다. 따라서 오차가 가장 적은 하위모델을 이용해서 최종 레지듀얼을 계산한다.

$$r = |r_j| = |y - \hat{y}_j| \\ = \min \{|r_j|\} = |y - y_j|, j=1, \dots, k. \quad (5)$$

위와 같이 최소값을 가지는 레지듀얼을 사용하게 되면 모델 불확실성에 대한 강인성은 증가하게 되지만, 고장진단 민감도는 감소하게 된다.

3.4 차량 주행상황의 판단

차량의 주행상황은 일반적으로 차량의 종방향속도와 조향각에 의해서 영향을 받게 된다. 또한, 조향각이 일정한 값을 가지게 되면 차량은 정상상태 회전을 하게 되고, 조향각이 있다해도 차량은 안전한 거동을 나타내므로 조향각의 미분값도 고려해서 그 기준을 정해야 한다. 하지만 센서신호는 잡음 등의 영향으로 미분값을 사용하는 것은 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 횡방향 가속도, 종방향 속도, 요 속도를 이용하여 다음과 같은 방법으로 정상상태와 과도상태를 판단하기로 한다.

차량의 센서로부터 측정되는 횡방향가속도는 식 (6)과 같이 차륜에 작용하는 tire force 와 공기저항력의 항으로 나타낼수 있다.

$$a_{y_sensor} = (\sum_{i=1}^4 (F_{tirey} \cos(\gamma_i) + F_{tirex} \sin(\gamma_i)) - \rho \cdot A \cdot \frac{Cd}{2} \cdot v_y^2) / m \quad (6)$$

여기서, Cd : 공기저항계수, A : 차량단면적, ρ : 공기 밀도이다.

2-DOF Bicycle Model 에서 횡방향 가속도는 식(7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$a_y = (\dot{v} + u \cdot r). \quad (7)$$

식 (7)에서 차량의 주행상태가 정상상태 회전일 경우에는 $\dot{v}=0$ 가 되므로 그때의 횡방향 가속도는 식 (8)과 같이 종방향 속도와 요 속도의 곱으로 표현된다

$$a_{y_steady} = u \cdot r. \quad (8)$$

따라서, 과도상태 구간에서는 센서에서 획득된 신호인 식 (6)과 요 속도, 종방향 속도의 곱으로 표시된 식 (8)의 차는 정상상태 구간에서보다 커지게 되므로 식 (9)와 같이 식 (6)과 식 (8)의 차를 구한후 식 (10)과 같이 일차필터를 통과시킨 신호를 이용해서 차량의 거동 상태를 판단하였다.

$$\Delta a_y = a_{lat_sensor} - a_{lat_steady} \quad (9)$$

$$a_{ev} = \frac{1}{\tau s + 1} \cdot \Delta a_y, \quad (a_{ev} < a_{th} : \text{정상상태}). \quad (10)$$

시상수와 a_{th} 는 센서잡음에 의해서 정해져야한다. 센서잡음이 크면 위에서 구한 값들이 기본적인 크기를 가지게되므로 a_{th} 도 역시 큰 값으로 설정하여야 한다.

3.5 고장진단

자동안전 로직에 의해서 계산된 레지듀얼과 기준값을 비교해 식 (11)을 만족하게되면 센서고장으로 판단하게된다.

$$|r| > J_{th}. \quad (11)$$

기준값은 차량의 일반적인 주행상황(On-center steering)을 기준으로 설정하였고, 기준값의 크기는 충분히 큰 값을 사용하는 것이 일반적이다.⁽⁸⁾

4. 실차실험 및 시뮬레이션

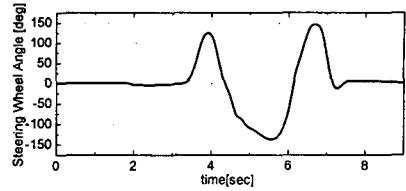
실험결과를 중심으로 각각의 하위모델에서 계산된 요속도, 횡방향속도, 조향각의 추정값과 레지듀얼, 레지듀얼이 기준값을 초과했을 경우의 경고 신호를 나타내었다. 시뮬레이션 은 실험결과와 조향각을 그대로 사용하였다. 종방향 속도는 ICC 를 사용하여 추종하였고 그때의 레지듀얼 변화를 나타내었다. 각 센서의 신호의 크기를 정상 신호의 70%와 50%로 변경시켜 센서고장 상황을 재현하였고, 센서 고장시 변화하는 레지듀얼의 크기를 시뮬레이션 결과와 비교하였다.

4.1 주행조건

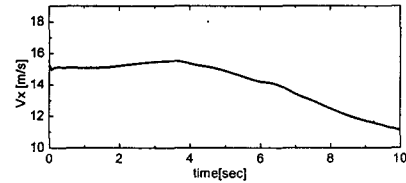
Fig. 6과 같이 최대 조향각이 150[degree] 이내인 이중차선변경 상황에서 10~15[m/s]의 주행속도를 유지하며 실험하였다.

4.1.1 실차실험 및 시뮬레이션 결과

Figs. 7~9 에 각각의 실차실험에서 계산된 하위 모델의 신호와 센서 고장시에 하위모델로부터 계산된 신호를 차량의 주행상황에 따라 정상상태와 과도상태로 나눠 계산한 레지듀얼을 나타내었다. Fig. 7 의 (a)에서 하위모델로부터 계산된 요속도 추정값이 실제의 정상 센서에서 측정된 요속도와 유사한 값을 나타내고 있음을 알 수 있다. Fig. 7 의 (b)는 Fig. 7 의 (a)에서 계산된 신호를 이용하여 계산한 레지듀얼을 나타내었다. 센서가 고장을 일으킨 경우에서 레지듀얼이 기준값을 초과하여 크게 증가함을 알 수 있다.

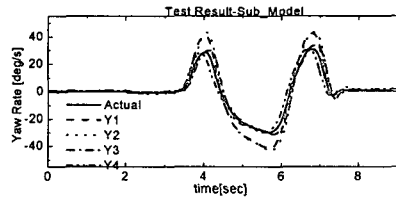


(a) Steering wheel angle

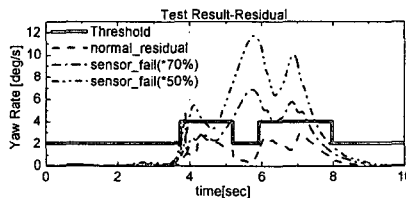


(b) Longitudinal velocity

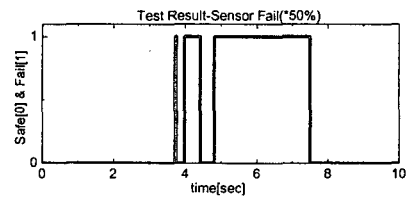
Fig. 6 Test input



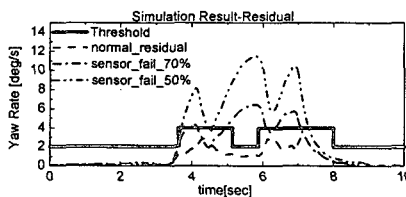
(a) Sub-models



(b) Test residual

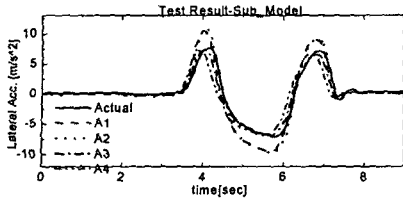


(c) Fault detection

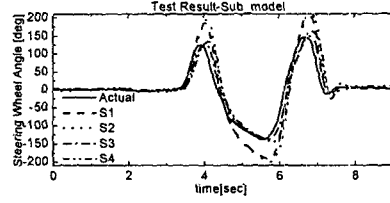


(d) Simulation residual

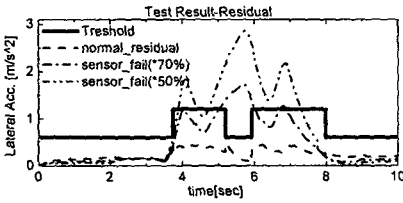
Fig. 7 Yaw rate



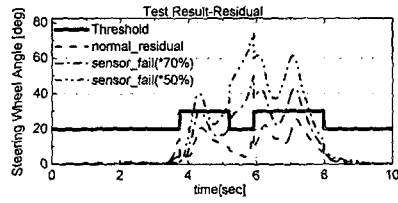
(a) Sub-models



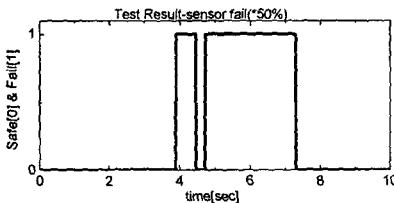
(a) Sub-models



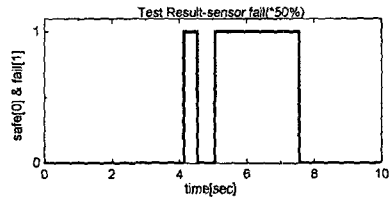
(b) Test residual



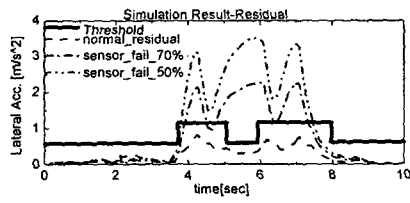
(b) Test residual



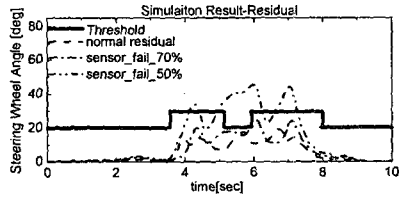
(c) Fault detection



(c) Fault detection



(d) Simulation residual



(d) Simulation residual

Fig. 8 Lateral acceleration

Fig. 9 Steering wheel angle

Fig. 7의 (b)와 같이 레지듀얼이 기준값을 초과하게 되면 Fig. 7의 (c)와 같이 시스템의 고장을 알리는 경고 신호가 발생하게 되고, 이 같은 신호를 기준으로 차량 안정성 제어기의 동작을 멈추게 되고, 운전자에게 해당 센서의 고장을 알리게 된다. Fig. 7의 (d)에 시험 차량의 주행상태와 같은 조건으로 시뮬레이션 모델을 이용하여 계산한 레지듀얼의 변화를 나타내었다. 시뮬레이션 결과도 차량 실험 결과와 유사함을 알 수 있다. Fig. 7의 요속도와 같이 Figs.8~9에 횡방향가속도와 조향각에 대하여 실험 결과와 시뮬레이션 결과를 나타내었고, Fig. 7에서와 같이 유사한 결과를 얻을 수 있었다.

5. 결론

본 연구에서는 이론적 접근을 통한 ESP의 자동 안전 로직을 개발하여 ESP 제어기에 적용되는 요속도 센서, 횡방향가속도 센서, 조향각 센서의 오작동을 감지하여 차량제어시스템의 안전을 보장하는 알고리즘을 개발하였다. 알고리즘 검증에 위하여 차량 주행 시뮬레이터를 제작하였고 실험 결과와 비교하여 시뮬레이터 모델을 검증하였다. 각각의 센서에 해당하는 3가지의 신호를 실차실험과 시뮬레이션을 통해 계산하여 자동안전 로직의 성능을 검증하였다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 국가지정연구실(M1-0302-00-0009)사업의 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) Giraud, I., Laurence, P. and Gissinger, G. L., 1996, "Real Time Fault Detection and Diagnosis: Application to Critical Behavior of Road Vehicle," AVEC'96 International Symposium on Advanced Vehicle Control, June 24-28
- (2) Bakker, E., Pacejka, H. B. and Linder, L., 1998, "A New Tire Model with an Application in Vehicle Dynamics Studies," SAE Transactions, Journal of Passenger Cars, Vol. 98, SAE Paper No. 890087
- (3) Yi, K., Hong, J. and Kwon, Y., 2001, "A Vehicle Control Algorithm for Stop-and-Go Cruise Control," Journal of Automobile Engineering, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Vol. 215 Part D, October, pp.1099~1115
- (4) Rajamani, R., Howell, A. S., Chen, C., Hedrick, J.K. and Tomizuka, M., 2001, "A Complete Fault Diagnostic System for Automated Vehicles Operating in a Platoon," IEEE Transactions on Control Systems Technology, July, Vol. 9, No. 4, pp. 553~564
- (5) Ding, S. X., Frank, P. M., 2002, "An Approach to the Detection of Multiplicative Faults in Uncertain Dynamic Systems," Proceedings of the 41st IEEE, Conference on Decision and Control, Las Vegas, Nevada USA, December, pp. 4371~4376
- (6) Ding, S. X., Jeansch, T., Frank, P. M. and Ding, E.L., 2000, "A Unified Approach to Optimization of Fault Detection Systems," International Journal of Adaptive Control and Signal Processing, Control Signal Process, pp.725~745
- (7) Fennel, H., Ding, E. L., 2000, "A Model-Based Failsafe System for the Continental TEVES Electronic-Stability-Program(ESP)," SAE Technical Paper, 2000-01-1635, SAE Automotive Dynamics & Stability Conference, Troy, Michigan, May 15-17
- (8) Frank, P. M., Duisburg, 1995, "Residual Evaluation for Fault Diagnosis based on Adaptive Fuzzy Thresholds," IEEE, paper No. 00477982