

종방향 차량 주행 시스템의 고장 진단 및 처리 알고리즘

문 일 기¹⁾ · 안 장 모¹⁾ · 이 경 수²⁾

한양대학교 자동차공학과¹⁾ · 한양대학교 기계공학부²⁾

A Fault Diagnosis and Fault Handling Algorithm for a Vehicle Cruise Control System

Il-Ki Moon¹⁾ · Jangmo Ahn¹⁾ · Kyongsu Yi^{*2)}

¹⁾Department of Automotive Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

²⁾School of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

(Received 21 December 2002 / Accepted 3 December 2003)

Abstract : This paper describes a fault detection and fault handling algorithm to be used in a longitudinal vehicle cruise control systems. The fault diagnosis system consists of two structures to generate proper residuals and to find that which component has a fault. A systematic design of the fault diagnosis system using model-based techniques is presented. A linear observer is used to create a set of signals sensitive to faults in a radar sensor. The fault handling system consists of two structures to compensate for faults and degraded system performance. Simulation results show that the algorithm is effective for a fault diagnosis and handling in a longitudinal vehicle cruise control system.

Key words : Fault diagnosis(고장진단), Residual(레지듀얼), Vehicle cruise control system(차량 주행제어 시스템), Fault tolerant control(고장허용제어)

Nomenclature

α : throttle angle(degree)

a : acceleration(m/s^2)

c_a : clearance between vehicles

P_d : differential pressure(pa)

R : residual

R_{gi} : i-th gear ratio

$T_{\#i}$: net engine torque

T_p : pump torque

v_f : forward vehicle speed

v_r : relative vehicle speed

v_s : subject vehicle speed

x : position of a vehicle

1. 서론

최근 제어시스템의 신뢰성과 안정성의 확보가 중요한 문제로 부각되고 있다. 이는 제어 시스템 자체의 복잡화와 자동화의 수준향상에 의해 전체적인 시스템의 규모가 대규모함에 따라 고장 요인과 발생빈도가 증가하고, 고장 발생시 시스템에 미치는 과급효과가 엄청난 손실을 초래하기 때문이다. 특히, 현재 연구 및 개발중인 차량주행 시스템은 운전자의 도움없이 레이더센서 및 기타 센서와 브레이크 및 스톱틀 액추에이터를 이용하여 자율주행이

*To whom correspondence should be addressed.
kyongsu@hanyang.ac.kr

가능한 제어 시스템이다. 따라서, 차량주행시스템에 관련된 센서 및 액츄에이터의 고장은 탑승하고 있는 운전자 및 주위 차량의 안전과 직접적인 관련이 있다. 종방향주행 시스템의 고장 탐지 및 처리에 관련된 연구에는 비선형관측기를 이용하여 고장을 탐지한 연구(Vivek, 1995; Sastry, 1998; Yi, 2001)가 있으며, 횡방향 제어 시스템의 고장탐지에 관한 연구는 차량 동역학 모델을 이용한 고장허용제어 기법에 대한 연구(Fennel, 2000)가 있다. 본 논문은 고장 진단과 고장처리 알고리즘을 차량주행시스템에 적용하여 차량주행시스템의 신뢰성 및 안정성을 확보하는 것을 목적으로 하였다. 고장처리를 위하여 finite state machine(FSM)방법을 이용하여 고장 발생 시 적절한 고장대처로직을 수행하는 알고리즘을 차량주행 시스템에 적용하였다.

2. 차량주행 시스템의 고장허용제어 구조

고장허용제어기의 구조는 크게 고장진단(fault diagnosis)과 고장처리(fault handling)부분으로 나누어 진다. 고장진단부분은 주행 시스템의 센서 및 액츄에이터의 상태값을 받아들여 레지듀얼을 발생시키고 고장 처리 부분은 발생된 레지듀얼을 이용하여 고장 발생 여부 및 위치를 파악하여 고장대처수행을 차량주행 시스템의 컨트롤러에 입력시키도록 되어있다. Fig. 1은 차량주행 시스템의 고장허용제어 구조를 개략적으로 나타낸 것이다.

고장진단과 고장처리를 위하여 FSM방법을 사용하였다. 이 처리방법은 두 단계(zero과 one)로 구성

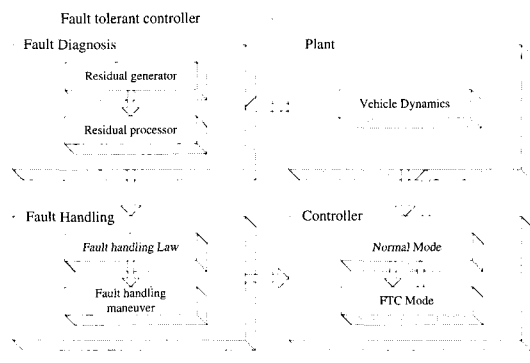


Fig. 1 Fault tolerant control structure

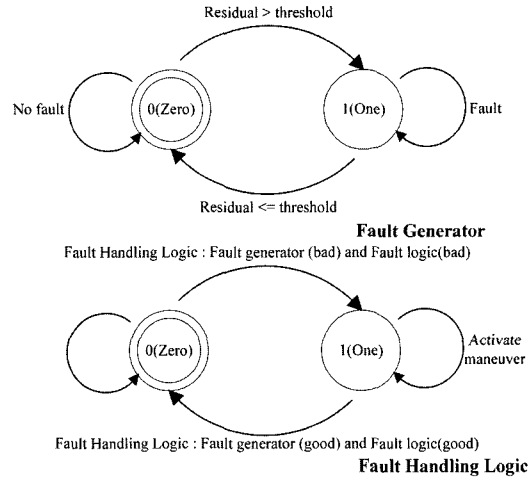


Fig. 2 Fault tolerant control structure

되어 있으며 0은 고장이 발생하지 않았을 경우를 나타내고 1은 고장을 발생 하였을 경우를 나타낸다. 고장진단 FSM의 초기값은 0을 나타내며 레지듀얼 발생기의 레지듀얼을 처리하여 상태가 변하게 된다. 고장처리로직 FSM은 고장진단 FSM방법과 동일하며 고장진단과 고장처리로직에 따라 고장대처 과정을 수행하도록 구성되어 있다. Fig. 2는 각각의 FSM기본구조를 나타낸 것이다.

2.1 고장처리로직

고장처리로직은 기본적으로 차량의 장착된 액츄에이터와 센서의 고장으로 인하여 수행할 수 있는 범위를 한정시키며 각부분의 고장에 대한 수행대처로직을 결정한다. 그 과정을 통한 AND와 NOT연산은 FSM방법을 이용하여 설계하였다. 고장처리로직을 이용함으로써 한정적으로 동시발생된 고장에 대한 처리를 가능케 하였다. Fig. 3은 고장처리로직과 고장대처로직의 구조를 개략적으로 나타낸 것이다.

2.2 고장대처수행

고장처리로직을 통하여 나온 상태에 따라 5가지의 수행모드를 정의 하였다. 각각의 수행 모드는 차량 주행 시스템의 액츄에이터 및 센서의 고장으로 인하여 차량의 수행가능한 모드를 한정짓고 그에 따른 고장대처수행을 컨트롤러에 입력하도록 구성되어있다. 따라서 현재 하드웨어적인 여분을 가지

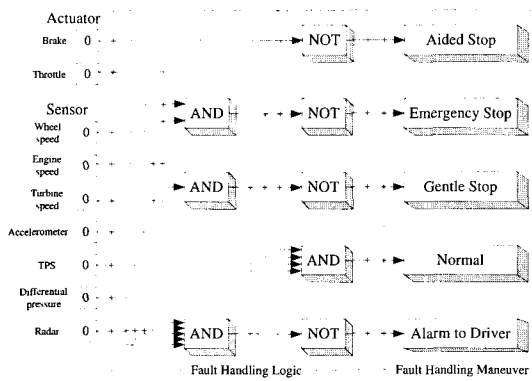


Fig. 3 Logic structure of fault handling for normal mode

Table 1 Fault handling maneuver

Fault handling maneuver	수행내용
Aided stop	직접적인 브레이크고장으로 외부의 도움없이 차량을 정지 시킬수 없는 경우
Emergency stop	심각한 고장으로 인하여 차량을 최대한 빨리 정지시켜야만 하는 경우(최대 브레이크토크를 발생시켜서 정지해야만 하는 경우)
Gentle stop	쓰로틀구동기에 고장이 발생하였기 때문에 차량을 정지시켜야 하는 경우(최대 브레이크토크를 사용하지 않고 운전자에게 편안한 느낌을 갖도록 설정하여 정지)
Normal	모든 센서 및 액츄에이터의 작동이 정상적일 경우
Alarm to driver	차량 주행 시스템의 주행에 관련하여 직접적인 영향을 미치지 않는지만 운전자에게 차량의 고장을 알려주므로써 정비 및 수리를 가능케 해야 할 경우

고 있지 않은 차량에 대하여 안정성을 보장하도록 구성되었다. 실제 차량 주행 시스템의 안전을 위하여 브레이크 및 레이더센서의 고장은 차량의 자율주행에 있어 치명적이라고 할 수 있다. 따라서 고장 발생시 적절한 고장대처수행을 통하여 차량의 안정성을 보장하는 것이 주목적이다. Table 1은 각각의 고장처리수행에 따른 수행내용을 정리한 것이다.

3. 종방향 주행제어 시스템의 고장진단

3.1 레지듀얼 발생기

레지듀얼 발생기는 차량주행시 발생하는 센서나 액츄에이터의 고장에 민감하게 반응하는 레지듀얼

을 발생하는 기능을 수행한다. 발생된 레지듀얼은 종방향 차량주행 제어 시스템에 사용되는 7개의 센서와 2개의 액츄에이터의 고장을 진단하기 위하여 사용된다. 종방향 차량 주행제어 시스템에서의 차량의 거동에 직접으로 영향을 끼칠 수 있는 부분은 크게 휠 스피드 센서의 고장, 레이더 센서의 고장, 쓰로틀, 브레이크 액츄에이터의 고장을 들 수 있다. 특히 쓰로틀, 브레이크 액츄에이터의 고장은 종방향 차량 주행제어 시스템의 정상적인 작동이 불가능하도록 만든다.

3.1.1 차량 속도 레지듀얼

차량의 속도 레지듀얼을 만들기 위하여 세가지 센서로부터 데이터를 이용한다. 휠 스피드(w_w) 센서, 엔진 스피드(w_e) 센서, 터빈 스피드(w_t) 센서는 엔진으로부터의 토크컨버터, 기어비, 종감속기어비를 걸치는 해석적인 관계에 있기 때문에 각각의 센서의 데이터는 차량 모델로부터 관계가 정의된다. 따라서 이러한 해석적인 관계를 이용하여 상호 비교함으로써 차량 속도에 관련되어진 센서들의 레지듀얼을 생성한다. 각 신호의 추정치를 다음과 같이 표시하면,

$$\hat{S}_1 = \omega_w \tag{1}$$

$$\hat{S}_2 = \omega_e \tag{2}$$

$$\hat{S}_3 = \omega_t \tag{3}$$

이 세가지 추정치를 상호 비교 함으로써 다음과 같이 차량 속도 레지듀얼을 생성한다.

$$R_1 = \hat{S}_1 - \hat{S}_2 \tag{4}$$

$$R_2 = \hat{S}_3 - \hat{S}_1 \tag{5}$$

$$R_3 = \hat{S}_3 - \hat{S}_2 \tag{6}$$

3.1.2 차량 거리 레지듀얼

레이더 센서는 차량 주행제어 시스템에서 차량간 거리정보를 얻는 기능을 수행한다. 현재 사용하고 있는 차량 주행제어 알고리즘은 선행 차량과 차차간의 상대속도, 상대거리(Clearance)를 이용하여 목

표감가속도를 설정하는 알고리즘을 사용하고 있다. 따라서 레이더 센서의 고장을 판별하는 것은 차량 주행제어 시스템의 원활한 수행을 위해서 중요한 부분을 차지하게 된다. 본 논문에서 레이더 센서의 고장을 진단하기 위하여 차량간의 거리를 예측하는 관측기를 사용하였다. 이 관측기는 레이더가 정상적으로 작동할 경우에는 실제 레이더 센서 측정치와 관측기의 추정값의 오차가 작게 존재하지만 만약 레이더 센서의 고장이 발생하였을 경우에는 일시적으로 실제 레이더 센서 측정값과 추정값의 오차가 크게 발생하게 됨을 이용한다. 제어기로부터 계산된 목표감가속도(a_{des})와 실제 자차의 가속도의 관계를 1차 지연시스템으로 가정 하였다. 시상수는 시뮬레이션을 통하여 0.5sec으로 결정하였다.

$$\begin{aligned} \dot{v}_s &= \frac{1}{\tau s + 1} a_{des} \\ \tau \dot{a}_s + a_s &= a_{des} \\ c_a &= x_f - x_s \\ v_r &= v_f - v_s \end{aligned} \quad (7)$$

위의 관계를 이용하여 다음과 같은 상대방정식을 얻을 수 있다. 여기서 입력값은 목표 감가속도로 설정하고 앞차의 가속도를 외란(w)으로 판단하였다.

$$\begin{aligned} x_1 &= v_s \\ x_2 &= a_s \\ x_3 &= c_a \\ x_4 &= v_r \end{aligned} \quad (8)$$

$$\dot{x} = Ax + Bu + Dw \quad (9)$$

$$y = Cx \quad (10)$$

위의 정의되어진 시스템에 대하여 다음과 같은 동적 모델의 상태로 근사 시킬 수 있다고 가정한다.

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + L(y - \hat{y}) \quad (11)$$

$$\hat{y} = C\hat{x} \quad (12)$$

적절한 관측기 가중행렬을 얻기 위하여 관측기

오차식을 이용한다. 여기서 w 의 차이를 라고 하자. 따라서 오차식은 다음과 같이 표현 된다.

$$e = (A - LC)e + Dw \quad (13)$$

만일 $A - LC$ 가 안정하면 오차벡터는 어떠한 초기 오차벡터에 대해서도 0(zero)으로 수렴한다. 오차벡터의 동역학이 점근 안정적이고 충분히 빨리 수렴하도록 행렬의 고유값을 선택하면 어떠한 오차벡터도 적절한 속도로 0에 수렴할 것이다. 또한 레이더 센서의 잡음과 실제 레이더 센서의 오류의 구별을 할 수 있는 관측기 게인행렬이 선택이 우선 되어져야 할 것이다.

위의 레이더센서의 관측기를 바탕으로 차량간 거리의 레지듀얼은 다음과 같이 정의 하였다.

$$\hat{S}_4 : \text{Measured Clearance} \quad (14)$$

$$\hat{S}_{4Estimated} : \text{Estimated Clearance} \quad (15)$$

$$R_4 = \hat{S}_4 - \hat{S}_{4estimated} \quad (16)$$

3.1.3 액추에이터 및 가속도 레지듀얼

쓰로틀 각, 가속도 센서의 값, 브레이크 차압센서의 값은 컨트롤러의 입력값, 즉 목표감가속도, 목표쓰로틀 각, 목표 차압과의 비교로써 레지듀얼을 생성시켜 센서의 고장을 탐지한다. 레지듀얼의 표현은 다음과 같다.

$$R_5 = \alpha - \alpha_{command} \quad (17)$$

$$R_6 = a_s - a_{desired} \quad (18)$$

$$R_7 = P_d - P_{dcommand} \quad (19)$$

3.1.4 엔진속도와 엔진속도 추정치의 레지듀얼

쓰로틀 각, 브레이크 토크 값을 이용하여 엔진스피드를 추정하고 그 값과 실제 엔진 스피드센서의 값을 비교하여 레지듀얼을 생성한다. 추정되어진 엔진스피드는 휠 스피드 센서의 고장 발생시 휠 스피드값을 추정 컨트롤러에 입력하므로써 종방향 주행 제어 시스템의 안정도를 보장한다. 엔진 스피드 추정식은 식 (20)과 식 (21)으로부터 식 (22) 같이 유

도할 수 있다. 차량으로부터 파라미터 정보는 실시간으로 업데이트 할 수 있다고 가정하였다. 따라서 식 (22)와 같이 실제 쓰로틀과 브레이크 입력을 통하여 엔진스피드를 추정할 수 있다. 또한 실제 엔진스피드와 추정된 엔진스피드를 비교 함으로써 쓰로틀 액츄에이터 작동시와 브레이크 액츄에이터 작동시를 구분하여 각각의 고장 진단을 위한 레지듀얼 생성이 가능하다.

$$J_e \dot{\omega}_e = T_{net}(\alpha, \omega_e) - T_b \quad (20)$$

$$M_v \dot{v} = F_{tr} - C_d v^2 - F_{roll} - mg \sin \theta \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \hat{\omega}_e = & \frac{T_{net} - C_d \frac{S_r^2}{R_t} (rR_{gt}R_d)^3 \hat{\omega}_e^2 - \frac{R_{gt}R_d}{R_t} (T_{br} + rF_{roll})}{J_e + \frac{S_r R_{gt}^2 R_d^2}{R_t} (r^2 M_v + J_w)} \\ & - \frac{\frac{R_{gt}R_d^2}{R_t} (r^2 M_v + J_w) (R_{gt}S_r + R_{gt}S_r') \hat{\omega}_e}{J_e + \frac{S_r R_{gt}^2 R_d^2}{R_t} (r^2 M_v + J_w)} \\ = & a(t)T_{net}(\hat{\omega}_e, \alpha) - a(t)b(t)\hat{\omega}_e^2 - e(t)\hat{\omega}_e \\ & - a(t)c(t)T_{br} - a(t)d(t)F_{roll} \end{aligned} \quad (22)$$

$$R_8 = \omega - \hat{\omega}_e \quad (23)$$

3.2 레지듀얼 처리기

레지듀얼 처리기는 레지듀얼 발생기에 의하여 발생되어진 레지듀얼을 이용하여 고장을 진단하고 시스템의 고장발생부분을 찾아내는 과정을 수행한다. 발생되어진 레지듀얼에 따른 고장판별을 위하여 발생 레지듀얼에 따른 적절한 한계값(threshold)을 설정하여 고장을 판별한다. 발생된 레지듀얼이 한계값을 넘을 경우에 해당 부분의 고장으로 판단한다. Table 2는 센서 및 액츄에이터에 따른 레지듀얼의 변화를 나타낸 것이다. 즉 레지듀얼값이 “H(high)”를 나타낸 경우는 한계값을 초과한 경우를 나타내고, “L(low)”값을 나타낸 경우는 한계값을 초과하지 않은 경우를 나타낸다. 한계값의 설정은 센서 및 액

Table 2 Fault diagnostics

Wheel speed sensor	H	L	H	L	L	L	L	L
Engine speed sensor	H	H	L	L	L	L	L	L
Turbine speed sensor	L	H	H	L	L	L	L	L
Radar sensor	L	L	L	H	L	L	L	L
Throttle position sensor	L	L	L	L	H	L	L	L
Accelerometer	L	L	L	L	L	H	L	L
Brake pressure sensor	L	L	L	L	L	L	H	L
Throttle actuator	L	L	L	L	H	H	L	H
Brakeactuator	L	L	L	L	L	H	H	H

Table 3 Decision of the threshold

Wheel speed sensor	8 km/h
Engine speed sensor	2 rad/sec
Turbine speed sensor	2 rad/sec
Radar sensor	2 m
Accelerometer	0.5m/s ²
Throttle sensor	1 degree
Brake pressure sensor	6000 [pa]

츄에이터의 특성에 따라 다르게 나타난다. 적절한 한계값의 설정은 고장진단의 신뢰성과 직접적인 관계를 가지고 있기 때문에 중요시 되어지는 부분이다. Table 3에서 각각의 센서와 액츄에이터의 특성을 고려한 한계값을 정리하였다.

4. 시뮬레이션 결과

먼저 차량주행시스템의 시뮬레이션을 위하여 차량의 목표속도 profile을 Fig. 4와 같이 설정하였다. 시뮬레이션을 통한 브레이크의 고장발생을 실현하기 위하여 약 45sec에서 브레이크 액츄에이터의 출력값을 0으로 변화시켰다. Fig. 5는 고장진단 과정중 레지듀얼 발생기에 나온 레지듀얼값을 나타낸다. Table 2에 따라 R₆, R₇, R₈ 값이 한계값을 초과할 경우 브레이크 액츄에이터의 고장을 선언할 수 있다. Fig. 6은 고장진단의 레지듀얼 발생기를 이용하여 FSM방법으로 처리한 결과이다. Fig. 7은 고장처리 로직에 의하여 차량의 브레이크액츄에이터 고장시 고장대처수행을 위한 FSM발생 신호를 보여주고 있

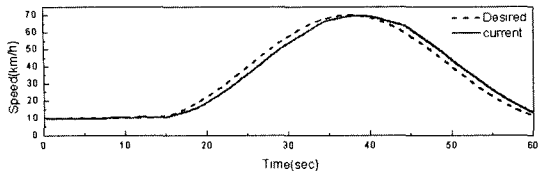
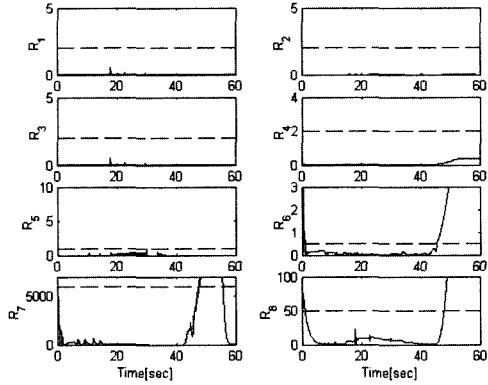


Fig. 4 Desired Vehicle speed profile



Sensors/Actuators	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	R ₅	R ₆	R ₇	R ₈
Brake actuator	L	L	L	L	L	H	H	H

Fig. 5 Residuals for a brake actuator fault at 45sec
(- - : threshold, — : Residual)

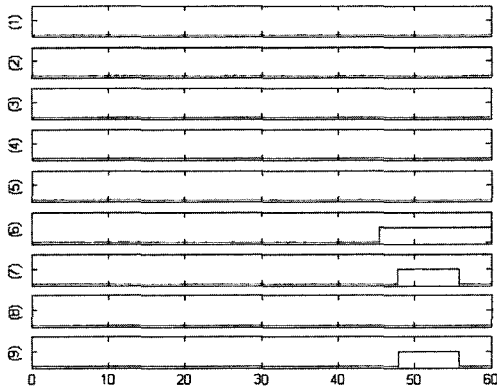


Fig. 6 Fault Diagnosis. (1) wheel speed sensor (2) engine speed sensor (3) turbine speed sensor (4) radar sensor (5) TPS (6) accelerometer (7) brake pressure sensor (8) brake actuator (9) throttle actuator

다. 브레이크고장으로 인하여 Aided Stop의 고장대처수행모드가 실행됨과 동시에 Normal모드는 실행을 중지하는 결과를 볼 수 있다.

5. 결론

중방향 차량 주행 제어 시스템에서 센서 및 액츄

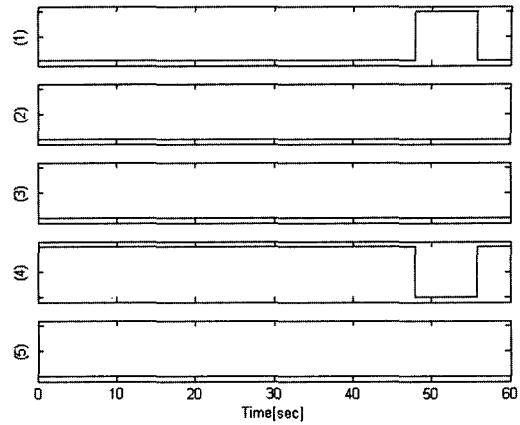


Fig. 7 Fault handling Logic. (1) aided stop (2) emergency stop (3) gentle stop (4) normal (5) alarm to Driver

에이터의 고장을 진단하고 고장에 따른 대처 알고리즘을 제안하였다. 시뮬레이션을 통하여 브레이크 액츄에이터의 고장진단 결과를 제시하였다. 제안된 알고리즘을 바탕으로 중방향 차량 주행 제어 시스템의 신뢰성 및 안전성을 향상시킬 수 있음을 보였다.

후 기

이 연구는 과기부 국가지정연구실(NRL M1030200000903J000000610)사업의 지원으로 수행되었음.

References

- 1) V. Garg, "Fault Detection in Nonlinear Systems : An Application to Automated Highway Systems," Ph. D. Thesis, UC Berkeley, 1995.
- 2) S. Sastry, R. Horowitz, K. Hedrick, "Design of Fault Tolerant Control Systems for AHS," Path Tech. Report UCB-ITS-PRR-98-16, UC Berkeley, 1998.
- 3) J. Yi, A. Howell, R. Horowitz, K. Hedrick, L. Alvarez, "Fault Detection and Handling for Longitudinal Control," Path Tech. Report UCB-ITS-PRR-2001-21, UC Berkeley, 2001.
- 4) H. Fennel, E. Ding, "A Model-Based Failsafe System for the Continental TEVES Electronic-Stability-Program (ESP)," SEA Technical Paper, 2000-01-1635, 2000.