전자 섀시 시스템에 대한 고장 진단

Fault Diagnosis for Electric Chassis Systems

。류 성 필*, 곽 병 학***, 정 훈 상**, 박 영 진****

* KAIST 기계공학과(Tel:81-042-869-3076;Fax:81-042-869-8220;E-mail:ant@kaist.ac.kr)
** 만도 기계(Tel:81-042-869-3076;Fax:81-042-869-8220;E-mail:bhkwak@mando.com)
*** KAIST 기계공학과(Tel:81-042-869-3076;Fax:81-042-869-8220;E-mail:elrond@kaist.ac.kr)
**** KAIST 기계공학과(Tel:81-042-869-3036;Fax:81-042-869-8220;E-mail:yjpark@sorak.kaist.ac.kr)

Abstract: In the near future, drive-by-wire systems will replace mechanical systems of vehicles. Since there would be no mechanical redundancy in the x-by-wire subsystem, it needs to improve the reliability of the system using fault diagnosis of sensors and actuators.

This paper proposes a Kalman filter based fault diagnosis method for the vehicle with the drive-by-wire system, which includes steer-by-wire, brake-by-wire and throttle-by-wire systems. We will show that the proposed method is successful in fault detection and isolation for single sensor/actuator faults of the vehicle system.

Keywords: Fault diagnosis, Kalman filter based approach, drive-by-wire system

1. 서론

고장 진단이란 우리가 대상으로 하는 시스템의 센서나 구동기 또는 시스템내부의 요소 등이 고장이 났을 때 고장의 종류와 크기, 그리고 고장이 난 위치를 알려주는 것을 말한다. 고장 진단론에는 수학적인 모델을 기반으로 하지않는 방법론과 수학적인 모델을 기반으로 센서나 구동기의 고장을 진단하는 방법론으로 나뉜다.

수학적 모델을 기반으로 하여 가장 많이 사용되는 고장 진단론[2]에는 파라 미터 추정을 이용한 고장 진단론, Parity 방정식을 이용한 고장 진단론 그리고 고장 검출 필터를 이용한 방법과 칼만 필터를 이용한 방법론으로 나뉜다.

먼저 파라 미터 추정을 이용한 고장 진단론은 시스템에 고장이 났을 때 마찰, 질량, 점성 등의 물리적인 시스템의 파라미터들에게 변화를 준다는 가정하에, 기준 모델로부터 구해진 파라미터값과 고장이 났을 때의 값을 서로 비교하여 고장진단을 하는 방법론이다. 시스템 파라미터들의 고장에 대해서는 손쉽게 고장 진단을 할 수 있으나 일반적으로 파라미터가 센서나 구동기와 직접적인 관계를 가지지 않으므로 센서와 구동기의 고장 진단이 쉽지않다.

Parity 방정식을 이용한 고장 진단론은 시스템에서 측정하는 신호와 일치하는 수학적인 모델을 구하여 측정값과 모델로부터 구해진 값간의 비교를 통해 고장진단을 하는 방법론이다. 수학적인 모델을 기반으로 하는 방법론 중에서 가장 간단하고 손쉽게 할 수 있는 방법론이나 시스템이 복잡한 경우 해당되는 측정 신호와 일치하는 수학적인 모델을 찾기가 어려운 점이 있다.

고장 검출 필터를 이용한 방법론은 관측 값과 측정값 간의 차인 residual 이 벡터 성분을 가지도록 필터의 게인 행렬을 디자인하여 고장 신호와의 일치 여부를 통해 고장을 진단하는 방법론이다. 고장 진단을 벡터 비교만으로 손쉽게 찾을 수 있으나 외란 이나 잡음 등의 영향을 고려하기가 어려워 정확한 모델링이 요구된다.

마지막으로 칼만 필터를 이용한 방법론[2]은 칼만 필터 이노베이션 프로세스의 특성인 residual 의 백색(whiteness)특성의 변화로 고장 진단을 하거나 평균값이나 분산의 변화로 고장진단을 하게 된다. 외란 이나 잡음의 영향을 고려하여 고장 진단을 할 수 있으며 비선형 시스템에서도 좋은 성능을 가지나 계산량이 많고 튜닝과정이 필요하다는 점이 단점이다.

본 연구에서는 전자 시스템인 'drive-by-wire' 시스템을 부 요소로 가지는 자동차에 대해 칼만 필터를 이용한 고장진단을 수행하고자 한다.

2. 시스템 모델

2.1. 시스템의 정의

본 연구에서 고려하는 시스템은 'drive-by-wire' 시스템을 부 시스템으로 가지는 자동차이다.

먼저 자동차는 구동력의 원인이 되는 타이어가 가지는 비선형성과 서스펜션에서의 비선형성 등의 고차 비선형성을 가지며 시간에 따라 시스템의 동 특성이 변하는 시스템이며 바람이나 노면의 형상, 노면 마찰과 고도변화와 같은 미지 입력과 질량변화와 관성력의 변화 등의 시스템 파라 미터들의 변화도 항상 존재하게 되는 복잡

한 특성을 가지고 있는 시스템이다.

‘drive-by-wire’ 시스템이란 입력과 출력간의 연결이 전기선으로 연결되어 해당 시스템을 구동하는 시스템으로 조향 시스템인 ‘Steer-by-wire’ 시스템, 브레이크 시스템인 ‘Brake-by-wire’ 시스템 그리고 추진 시스템인 ‘Throttle-by-wire’ 시스템이 본 연구에서 고려되는 부 시스템이다.

‘Steer-by-wire’ 시스템은 핸들을 돌리게 되면 그 신호가 마이크로 프로세서를 통해 랙앤피니언을 구동하는 모터에게 신호를 보내어 자동차의 바퀴를 회전시키게 되며, ‘Brake-by-wire’ 시스템은 운전자가 가하는 페달 각에 따라 페달에 작용하는 힘과 이동거리에 대한 신호가 제어기로 보내져 감속의 정도를 결정하게 되며, 제어기의 신호가 각 바퀴에 있는 전기 모터에 가해져 제동토크를 만들어 내게 된다. ‘Throttle-by-wire’ 시스템에서 페달은 스로틀에 직접 연결되지 않고 운전자가 가하는 입력만을 받는 센서로서의 역할을 하며, 스로틀을 얼마나 빨리 얼마나 많이 열어줄 것인지를 결정하는 제어기에 신호를 송신하게 된다. 마지막으로 제어기로부터 나온 신호가 스로틀 장치내의 전기 모터에 가해져 스로틀을 동작시키게 된다.

그림 1. ‘X-by-wire’ 시스템

2.2. 자동차 모델

본 장에서 고려하는 자동차 모델은 고장 진단을 하기 위한 대상 시스템으로 차체, 타이어, 조향 장치, 제동 장치, 그리고 엔진 및 동력 전달장치로 이루어져 있다.

차체 모델[6]인 15자유도 모델은 3차원 공간상의 강체로 회전과 병진 운동의 6자유도의 스프링상 질량부(sprung mass)와 2개의 현가 장치 변위, 전륜 바퀴 2개의 회전 (spin)운동과 1자유도의 조향 등 5개의 자유도를 갖는 전륜 스프링하 질량부 (front unsprung mass), 그리고 현가 장치 변위 2개와 후륜 바퀴 2개의 회전운동 4개의 자유도를 갖는 후륜 스프링하 질량부(rear unsprung mass)로 구성되어 있다. 노면과 타이어 사이에 발생하는 힘과 모멘트에 의해 차량이 거동하게 되고 이는 타이어 모델로 표현되며 본 연구에서는 실차와 비슷한 특성을 나타내는 UA 타이어 모델을 사용한다.

‘Steer-by-wire’ 시스템과 ‘Brake-by-wire’ 시스템을 모사하기위한 조향 시스템, 브레이크 시스템 모델은 지금까지 개발된 전동식 조향 장치[5]와 유압식 브레이크 시스템과 비슷한 동 특성을 가진다는 가정하에 1차로 모델링 하였으며, 엔진과 파워트레인[3][7]은 기존의 엔진 모델을 사용하였으며, 변속기 부분의 동 특성은 무시하고 스로틀 개도 각에 의해 결정되는 기어맵[4]을 사용하였다.

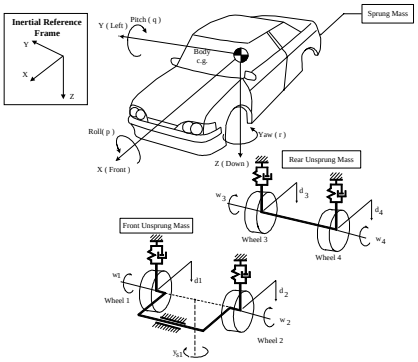


그림 2. 15자유도 모델

3. 고장 종류 및 검출 알고리즘

3.1. 고장 종류 및 형태

본 연구에서는 ‘drive-by-wire’ 시스템 자체가 고장 진단 기능이 있다는 가정을 하고, 자동차의 동역학적인 관점에서의 고장 진단을 하고자 하며 실제로 사용되고 있는 센서인 횡 방향과 종 방향 가속도 센서, 요 속도센서, 휠 속도 센서와 조향 구동기와 브레이크 구동기, 스로틀 구동기의 구동기에 대한 고장진단을 하고자 한다. 고장 신호는 갑자기 커지거나 작아지는 경우와 신호의 게인 값이 변하는 경우를 고려하였다.

3.2. 고장 검출 알고리즘

칼만 필터를 기반으로 하는 고장 진단론을 사용하였는데, 칼만 필터란 잡음이 내재하는 확률적 시스템(Stochastic system)의 상태를 추정하는 동적 시스템이며, 식(1)과 같이 표현되는 동적 시스템이 제공하는 상태출력 x(t)의 t=T에서의 값을 추정하되 상태 값과 추정한 값($\hat{x}(t)$)간의 평균제곱오차 식(2)를 최소화하도록 하는 일종의 관측기이다.

$$\hat{x}(t+1) = \hat{G}(t)\,\hat{x}(t) + \hat{H}(t)u(t) + K_e(t)[y(t) - \hat{y}(t)] \quad (1)$$

$$E[\|x(T) - \hat{x}(T)\|^2] = \sum_{i=1}^{n} E[(x_i(T) - \hat{x}_i(T))^2] \quad (2)$$

칼만 필터 기반 고장 진단 방법론[1]은 상태 값과 추정한 값간의 차인 이노베이션 프로세스($\Delta(k)$)의 분산 행렬(Covariance matrix)을 구하여 행렬의 대각 성분들의 합으로 고장을 검출하는 방법론(Trace of the covariance matrix)과 행렬식을 구하는 방법(Determinant of the covariance matrix) 과 평균값을 구하는 방법(Mean of the covariance matrix), 최대 고유치를 구하는 방법(Maximal

eigenvalue of the covariance matrix)이 있으나 각 방법론들이 고장 검출은 되나 분리가 어려워 본 논문에서는 각각의 상태변수에 대해 칼만 필터를 설계하여 식(3)과 같이 구해지는 대각성분 분산($\hat{S}(k)$)을 residual로 정의하고 이를 이용하여 고장을 진단을 하고자 한다. 여기서 분산을 구하기 위한 데이터의 개수인 M은 크기에 비례하여 고장이 발생하는 시점을 알 수 있는데 본 연구에서는 이를 고려하여 20으로 가정하였다.

$$\hat{S}(k) = \frac{1}{\mathbb{M}\text{-}1} \sum_{j=k-M+1}^{k} [\Delta(j) - \bar{\Delta}(k)][\Delta(j) - \bar{\Delta}(k)]^T \qquad (3)$$

$$\text{where} \quad \bar{\Delta}(k) = \frac{1}{M} \sum_{j=k-M+1}^{k} \Delta(j)$$

4. 고장 진단을 위한 간략한 모델

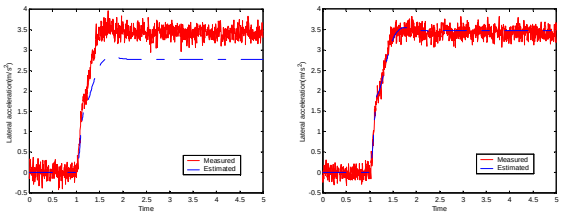
먼저 자동차의 회전 동 역학을 묘사하는데 사용되는 횡 방향 가속도와 요 속도에 대한 2자유도 모델을 구하고 이를 바탕으로 선형 칼만 필터를 디자인 한다. 측정신호의 잡음은 20dB로 가정하였다.

$$M(\dot{v}_y + v_x r) = \sum_i Y_i \qquad (4)$$

$$I_z \dot{r} = \frac{t_f}{2}(X_{fl} - X_{fr}) + \frac{t_r}{2}(X_{rl} - X_{rr}) + a(Y_{fl} + Y_{fr}) - b(Y_{rl} + Y_{rr}) \qquad (5)$$

아래 첨자는 바퀴의 위치($i = fr, fl, rr, rl$)를 표시한 것이며, X_i, Y_i 는 타이어에서 발생하는 힘을 자동차의 종, 횡 방향에 대하여 표시한 것이다.

연구의 목적이 출력 신호의 고장 진단이므로 이를 위하여 출력신호를 근거로 추정하지 않고 시스템 모델을 근거로 신호를 추정하여 고장 발생시 빠른 진단을 할 수 있도록 시스템 모델의 잡음 크기인 $Q(k)$를 조정하여 필터 게인을 결정하면 *그림3.*에서처럼 추정 값과 측정 값 사이에 일정한 크기의 편차가 발생하는 것을 볼 수 있다. 이는 시스템 모델(15자유도 모델)에 비해 칼만 필터의 설계에 사용한 선형 모델인 2자유도 모델이 질량이동을 고려하지 못하는 등 실제 시스템과의 차이로 인해 발생하였다. *그림4.*는 이때의 추정 오차맵을 나타내고 있다.



<보정하지 않은 경우> <보정한 경우>

그림 3. 횡 가속도 응답

칼만 필터로부터 추정된 신호가 고장진단의 기준이 되기 위하여 고장이 없는 경우의 측정값과 근사적으로 같아야 하므로 이러한 추정 오차를 해결하기위해 핸들의 회전 각도와 자동차의 종 방향 속도에 따라 시스템의 정상상태에서의 값과 칼만 필터로부터 나오는 값을 *그림4.*의 추정 오차맵을 이용하여 적정 구간에 대해 일정한 상수 값을 곱하는 보정방법을 사용하였다.

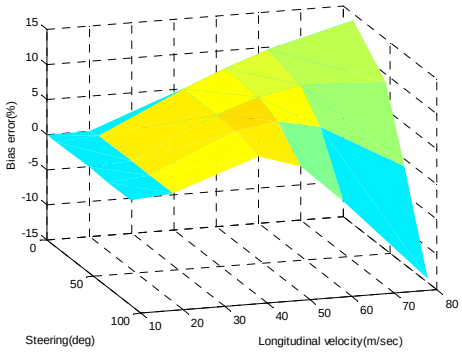


그림 4.추정 오차맵

휠 속도 모델은 앞 바퀴는 식(6), 뒷바퀴는 식(7)과 같이 표현되며 종 가속도 모델은 식(8)과 같이 나타내어진다. 휠 모델은 선형 칼만 필터로 디자인 하였으나 종 방향 가속도는 비선형으로 모델링 되어 확장 칼만 필터로 디자인 하였다.

$$I_{wf}\dot{\omega}_{fr,fl} = -F^x_{fr,fl} r_0 + T^e_{fr,fl} - T^b_{fr,fl} \qquad (6)$$

$$I_{wr}\dot{\omega}_{rr,rl} = -F^x_{rr,rl} r_0 - T^b_{rr,rl} \qquad (7)$$

$$M(\dot{v}_x + v_y r) = \sum_i X_i \qquad (8)$$

앞 바퀴의 경우는 구동 토크($T^e_{fr,fl}$)와 제동 토크($T^b_{fr,fl}$)를 입력으로 사용하며, 뒤 바퀴는 제동력을 입력으로 사용한다.

5. 모의 실험

급제동과 급 가속의 경우는 칼만 필터설계에 사용한 모델들이 정확하지 못하므로 서서히 가속하고 감속하는 조건에서 고장 진단을 수행하다.

모의 실험에서는 모든 센서와 구동기의 고장에 대하여 검증하였으며 본 장에서는 정속 80km/hr 의 속도로 주행 중 3 초 지점에서 핸들을 돌리는 상황에서 조향 구동기에 고장이 발생한 경우에 대하여 도시한다. *그림5.*는 횡 방향 가속도 센서의 경우이고, *그림6.*은 요 속도 센서의 경우에 대하여 도시하였다.

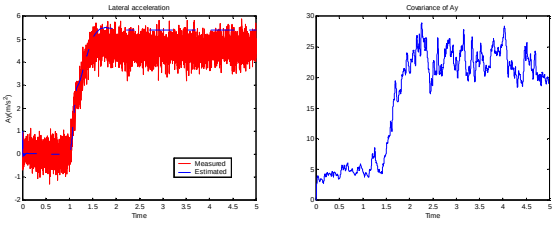


그림 5.횡 방향 가속도 응답과 분산 변화

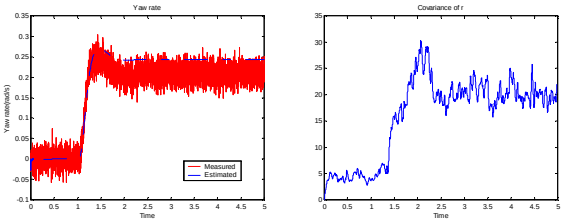


그림 6.요 속도 응답과 분산 변화

아래의 표1.은 모의 실험을 수행하여 각각의 센서나 구동기가 고장이 났을 때 미리 결정된 threshold 값을 넘는 residual을 부분을 표시한 것이다. 즉 횡 방향 가속도(Ay), 요 율(r), 앞의 오른쪽 바퀴(W_{fr}), 앞의 왼쪽바퀴(W_{fl}), 뒤의 오른쪽 바퀴(W_{rr}), 뒤의 왼쪽 바퀴(W_{rl}) 그리고 종 방향 가속도(Ax)에 대한 각각의 residual , 즉 칼만 필터의 이노베이션 프로세스의 분산 값을 R1~R7으로 정의 하였고 시스템의 특성을 고려하여 정하게 되는 고장 발생의 기준(Threshold)을 넘지 않으면 0, 기준을 초과 하였을 경우는 1로 표시 하였다.

조향 구동기는 S.A(Steering Actuator), 앞의 오른쪽과 왼쪽바퀴의 브레이크 구동기를 $B.A_{fr}$(Brake Actuator), $B.A_{fl}$로 뒤의 오른쪽과 왼쪽바퀴의 브레이크 구동기를

표1. 고장 진단 검출도표

	Ay	r	W fr	W fl	W rr	W rl	Ax	S. A	B. A Fr	B. A fl	B. A rr	B. A rl	T. A
R1(Ay)	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0
R2(r)	0	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0
R3(W_{fr})	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1
R4(W_{fl})	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1
R5(W_{rr})	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	1
R6(W_{rl})	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	1
R7(Ax)	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	1

$B.A_{rr}$, $B.A_{rl}$ 그리고 스로틀 구동기는 T.A(Throttle Actuator)로 나타내었다. *표1.*의 위쪽은 고장이 발생 할 수 있는 센서와 구동기를 나타내고 왼쪽은 각 센서의 residual을 나타낸다.

단일 센서의 고장인 경우에는 해당되는 residual이 고장을 가리키게 되고, 구동기의 고장인 경우에는 여러 센서가 고장이 발생하는 것을 알 수 있다.

우리가 고장 진단의 기준으로 사용하는 필터의 입력은 종 방향속도인데, 본 연구에서는 뒷바퀴의 휠 속도로부터 구해진 종 방향 속도를 사용하기 때문에 뒷바퀴의 구동기가 고장 나는 경우 칼만 필터가 전체적으로 오동작을 하게 되어 모든 센서의 residual이 기준 값을 넘어 고장을 가리키게 된다.

6. 결론

본 논문에서는 자동차의 동역학적 관점에서 요구되는 센서와 구동기의 단일 고장에 대하여 고장을 검출하고 분리하였다. 이로써 'drive-by-wire' 시스템을 가지는 자동차시스템에 대한 신뢰도를 증가 시키게 되었다.

단일 고장이 발생하는 경우 고장 진단 검출 도표를 이용하여 해당되는 센서와 구동기의 고장을 검출할 수 있다.

Acknowledgement

본 논문은 교육 인적자원부의 BK 21 사업의 일부 지원으로 수행하였습니다.

참고문헌

[1] F. Caliskan, C. M. Hajiyev., "Innovation Sequence Application to Aircraft Sensor Fault Detection : Comparison of Checking Covariance Matrix Algorithms", ISA Transactions 39, pp. 47-46, 2000

[2] J. Chen and R. J. Patton., "Robust Model-Based Fault Diagnosis for Dynamic Systems", Kluwer Academic Publishers,1999

[3] Cho, D. and Hedrick, J. K., "Automotive Powertrain Modeling for Control", Trans. of the ASME , Journal of Dynamic Systems Measurement and Control, Vol. 111, pp. 568 - 576, 1989

[4] M. K. Salaani., "Powertrain and Brake Modeling of the 1994 Ford Taurus for the National Advanced Driving Simulator", SAE paper 981190

[5] H. Qui, Q. Zhang, J. F. Reid, D. Wu, "Modeling and simulation of an Electrohydraulic steering system", ASAE paper 993076

[6] 곽병학, "차량 안정성 제어 시스템의 강인성 제어기 설계",KAIST 박사 학위 논문, 2001

[7] 정훈상, "차량 구동력 제어 시스템의 제어기법에 관한 연구",KAIST 석사 학위 논문, 2000