Steer-by-Wire 시스템의 감지기에 대한 강인한 이상진단 기법

문승욱*(한양대 대학원 기계설계학과), 지용관(한양대 대학원 기계설계학과), 허건수(한양대), 조동일(서울대), 박장현(한양대)

A Robust Method of Fault Diagnosis for Steer-by-Wire System's Sensor

S.W. Moon(Mech. Eng. Dept., HYU), Y.K. Ji(Mech. Eng. Dept., HYU), K.S. Huh(HYU), D.I. Cho(SNU), J.H. Park(HYU)

ABSTRACT

This paper proposes an analytical redundancy technique for fault diagnostics of the sensor in steer-by-wire system. We use incorporating vehicle dynamics modeling into the design of a diagnostic system for steer-by-wire system. The use of a model of vehicle dynamics improves the speed and accuracy of the diagnoses. The proposed fault diagnostics algorithm is based on parity-space methods to generate residuals. To reduce the effects of modeling uncertainty and dynamic transients, the residuals are subject to filtering. We construct diagnostic system consisting residual threshold for detection and isolator with using the directional residual vector.

Key Words : Steer-by-Wire system (전자식 조향시스템), Sensor Fault (감지기 고장), Fault Detection(고장검출), Fault-decoupling Parity-space Method (패리티 공간기법), Analytical redundancy (해석적 중복)

1. 서론

아직 개발 초기단계이지만 기계적 링크기구 없이 단지 전기적인 신호만으로 유압 또는 전기모터의 보조력에 의해 타이어를 조향하는 Steer-by-Wire 시스템이 등장하고 있다. 이 시스템의 장점은 기계적으로 연결되어 있는 링크기구가 없기 때문에 차량구성에 있어서 자유도가 높고, 가격이 저렴하며 제어의 자유도가 높다는 것이다. 또한 원격 제어가 필요한 차량이나 기계적인 조향칼럼을 장착하기 어려운 차량 등에 유효하게 사용될 수 있다. 그러나 전기적인 보조력이 없으면 전혀 조향할 수 없으며 전선이 끊어진 경우나 접촉부분의 불량 등에 의해 신호가 전달되지 않으면 조향이 불가능하게 된다. 이처럼 Steery-by-Wire 시스템과 같은 Drive-by-Wire 기술의 도입으로 차량의 능동 안전성(active safety)에 대한 개념이 강조되면서 차량의 안전성에 대한 높은 수준의 신뢰성이 요구되고 있다.7) 특히 전자제어 시스템의 경우, 시스템 요소의 이상이나 고장에 대한 견실성을 확보하므로써 신뢰성을 향상 시킬 수 있기 때문에 차량의 안전성 제어를 위해서는 발생할 수 있는 이상이나 고장에 대한 신속 정확하게 진단하는 이상 진단기법이 필요하다.

전자제어 시스템에서 고장에 대한 관점은 크게 구동기, 감지기, 통신, 소프트웨어 네 가지로 분류하여 연구가 진행 중이며 본 논문에서는 Steer-by-Wire 시스템에 필요한 감지기의 이상이나 고장을 진단하기 위한 해석적 중복기법(analytical redundancy)을 제안한다. 진단시스템에 있어 외란과 잡음, 모델링의 불확실성은 진단시스템의 정확성과 반응속도를 제한하는 원인이 된다. Steer-by-Wire 시스템의 경우 타이어에 의한 횡력은 조향구동기에 외란토크로 작용한다. 만약 진단 시스템에 차량동역학이 고려되지 않는다면 외란토크는 단순한 잡음으로 간주되어 진단시스템의 성능과 정확도를 저하시킬 수 있다. 차량동역학과 차량 상태변수의 추정기법을 통하여 조향장치에 작용하는 외란토크는 모델링 될 수 있으며 진단시스템도 이러한 모델링을 바탕으로 설계되어야 한다.

본 논문은 Steer-by-Wire 시스템에 대한 고장 진단을 위해 차량과 조향계를 선형시스템으로 모델링하고 이에 대한 해석적 중복을 패리티(parity) 공간기

법을 통해 구현한다.

2. 대상 시스템의 모델링

2.1 Steer-by-Wire 시스템의 통합모델

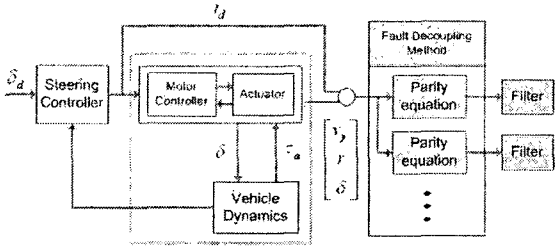

Fig 1 Steer-by-Wire System Block Diagram

Fig. 1은 Steer-by-Wire 시스템의 전체 구성도를 도식화한 것이다. Steer-by-Wire 제어기는 운전자로부터 조향각을 입력받고 DC 모터를 이용하여 차량의 회전에 필요한 토크를 발생시킨다. 동시에 DC 모터에 차량과 지면의 상태에 따른 외란토크가 작용하게 된다. 따라서 실제 차량의 조향계에 장착된 조향각 감지기를 이용하여 Steer-by-Wire 제어기는 피드백 제어를 수행하게 된다.

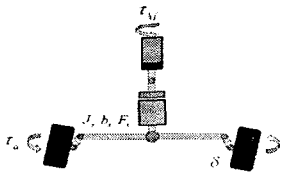

Fig. 2 System Block diagram

Steer-by-Wire 시스템의 조향계는 Fig. 2와 같이 나타내어 다음 관계식으로 유도할 수 있다.

$$J_s\ddot{\delta} + b_s\dot{\delta} + \tau_f + \tau_a = N_s N_t \tau_m \quad (1)$$

이 때, 조향 구동기에 의한 토크(τ_m)는 모터상수와 공급전류, 그리고 모터 기어비와 효율을 이용하여 식(2)와 같이 얻을 수 있다.

$$\tau_m = k_m i_m r_m \eta \quad (2)$$

식(1)과 (2)를 결합하여 (3)과 같은 상태변수 방정식을 유도해 낼 수 있다.

$$\begin{vmatrix}\dot{\delta}\\ \ddot{\delta}\end{vmatrix} = \begin{vmatrix}0 & 1\\ 0 & -\frac{b_s}{J_s}\end{vmatrix}\begin{vmatrix}\delta\\ \dot{\delta}\end{vmatrix} + \begin{vmatrix}0 & 0\\ \frac{N_s N_t k_m r_m \eta}{J_s} & -\frac{1}{J_s}\end{vmatrix}\begin{vmatrix}i_m\\ \tau_a\end{vmatrix} + \begin{vmatrix}0\\ -\frac{1}{J_s}\end{vmatrix}\tau_f \quad (3)$$

조향구동기에 작용하는 외란 중에서 자가 정렬토크(τ_a)는 Steer-by-Wire 시스템에서 가장 중요한 외란이므로 단순히 확률적인 잡음이나 크기가 제한된 미지의 신호로 간주한다면 고장에 민감하게 반응할 수 없다. 따라서 자가 정렬토크를 차량 동역학을 이용하여 진단시스템의 설계에 필요한 모델링에 포함시키고자 한다.

한편, 차량의 횡방향 운동은 2 자유도 모델을 통해 분석할 수 있으며 v_y와 r을 이용하여 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{vmatrix}\dot{v}_y\\ \dot{r}\end{vmatrix} = \begin{vmatrix}-\frac{2C_{\alpha f}+2C_{\alpha r}}{mv_x} & \frac{2C_{\alpha r}b-2C_{\alpha f}a}{mv_x}-v_x\\ \frac{2C_{\alpha r}b-2C_{\alpha f}a}{I_z v_x} & -\frac{2C_{\alpha r}b^2+2C_{\alpha f}a^2}{I_z v_x}\end{vmatrix}\begin{vmatrix}v_y\\ r\end{vmatrix} + \begin{vmatrix}\frac{2C_{\alpha f}}{m}\\ \frac{2C_{\alpha f}a}{I_z}\end{vmatrix}\delta \quad (4)$$

자가 정렬토크는 차량의 상태변수와 연관이 있으므로 식(5)와 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$\tau_a = -C_{\alpha f}(t_m + t_p)\left(\frac{v_y + ar}{v_x} - \delta\right) \quad (5)$$

모델을 선형화시키기 위해서 t_m과 t_p, $C_{\alpha f}$는 상수라고 가정한다. 식(3), (4), (5)를 결합하여 차량과 조향계에 대한 통합된 상태변수 방정식을 식(6)과 같이 최종적으로 유도할 수 있다.

$$\dot{x} = Ax + B_u i_m + B_d \tau_f \quad (6)$$
$$x = [v_y \quad r \quad \delta \quad \dot{\delta}]^T$$

$$A = \begin{vmatrix}-\frac{C_{\alpha f}+C_{\alpha r}}{mv_x} & -v_x + \frac{C_{\alpha r}b - C_{\alpha f}a}{mv_x} & \frac{C_{\alpha f}}{m} & 0\\ \frac{C_{\alpha r}b - C_{\alpha f}a}{I_z v_x} & -\frac{a^2 C_{\alpha f} + b^2 C_{\alpha r}}{I_z v_x} & \frac{aC_{\alpha f}}{I_z} & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1\\ \frac{(t_m+t_p)C_{\alpha f}}{I_s v_x} & \frac{a(t_m+t_p)C_{\alpha f}}{I_s v_x} & -\frac{(t_m+t_p)C_{\alpha f}}{I_s} & -\frac{b_s}{J_s}\end{vmatrix}$$

$$B_u = \begin{vmatrix}0\\ 0\\ 0\\ \frac{N_s N_t k_m r_m \eta}{J_s}\end{vmatrix} \quad B_d = \begin{vmatrix}0\\ 0\\ 0\\ -\frac{1}{J_s}\end{vmatrix}$$

2. 진단 시스템

3.1 고장 및 이상의 형태

고장은 시간에 따라 Fig. 3에 도시한 것처럼 급진적 고장(abrupt fault), 점진적 고장(gradual fault), 간헐적 고장(intermittent fault)으로 크게 나눌 수 있다. 그리고 시스템에 영향을 미치는 관계에 따라 덧셈형태(additive)와 곱셈형태(multiplicative)의 고장으로 나눌 수 있다. 전자는 센서와 같은 감지기의 오프셋이나 바이어스와 같은 현상을 표현하기에 적합하며 후자는 시스템의 파라미터의 변화, 등을 표현하기에 적합하다. 본 논문에서는 Steer-by-Wire 시스템의 감지기에 대한 고장을 진단하려하므로 덧셈형태의 급진적인 고장만을 다루도록 한다.

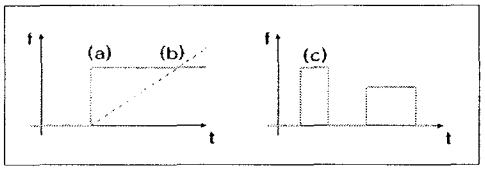

Fig. 3 Fault type

3.2 진단 시스템의 설계

2절에서 언급한 차량과 조향계의 통합 모델을 기반으로 하여 감지기에 대한 고장의 형태를 상태변수 방정식에 포함시켜 다음과 같이 구성한다.

$$x_{t+1} = Ax_t + B_u u_t + B_d d_t + B_f f_t + B_v v_t$$
$$y_t = Cx_t + D_d d_t + D_f f_t + e_t \quad (7)$$

식(7)에서 f_t는 대상 시스템에서 발생할 수 있는 모든 고장을 나타내는 칼럼(column) 벡터이며, 고장이 발생하지 않은 경우에 $f_t = 0$이 되고 고장이 발생한 경우에는 고장의 크기에 비례하여 $f_t = m_t f^i$와 같이 표현된다. 단일 고장일 경우 f_t는 한 행만 1이고 나머지 행은 모두 0인 $n \times 1$ 차원의 칼럼벡터이며 n은 고장의 종류, m_t는 고장의 크기를 의미한다. 여기서 v_t는 시스템 잡음을 의미하며 e_t는 감지기의 관측 잡음을 나타낸다. 잡음은 모두 평균이 0인 가우시안 백색잡음이며 분산(variance)은 각각의 감지기에 의해 결정된다고 가정한다. 또한 제안된 해석적 중복기법은 감지기에 대한 고장만을 다루기로 했으므로 식(7)에서 $B_f = 0$이 된다.

본 논문에서 제안하는 진단 시스템은 대상 시스템의 실제 신호와 모델간의 불일치를 잔차(residual)로 산출하는 패리티 공간기법에 기반을 둔다. Steer-by-Wire 제어기의 입력 전류와 차량에서 측정한 요속도, 횡속도, 조향각의 출력신호를 이용하여 각각의 고장에 대해서만 반응하는 잔차들을 생성한다. 패리티 공간기법을 사용하기 위해서는 대상 시스템의 모델링을 이용하여 패리티 공간으로 선형변환 시키는 변환벡터(W_i)들을 구하고 반복적인 작업을 위한 행렬들을 정의한다. 즉 각각의 정해진 고장에 대해서 변환벡터가 존재하게 된다. 또한 입출력 신호의 축적횟수를 가리키는 시간창(sliding-window)이라는 파라미터도 동시에 설정해야 하며 시간창을 적용하여 시스템의 입출력신호를 (8)과 같이 정의할 수 있다.

$$Y_t = (y_{t-L+1}^T, \cdots, y_t^T)^T$$
$$U_t = (u_{t-L+1}^T, \cdots, u_t^T)^T \quad (8)$$

그리고 대상 시스템의 모델을 이용하여 (9)와 같이 각 신호에 대한 Hankel 행렬과 (10)의 관측행렬도 정의한다.

$$H_s = \begin{bmatrix} D_s & 0 & \cdots & 0 \\ CB_s & D_s & \cdots & 0 \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ CA^{L-2} & \cdots & CB_s & D_s \end{bmatrix} \quad s \in \{u, f, v\} \quad (9)$$

$$O = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ \vdots \\ CA^{L-1} \end{bmatrix} \quad (10)$$

식(7)은 (8),(9),(10)에 의해서 다음과 같이 나타내어진다.

$$Y_t - H_u U_t = Ox_{t-L+1} + H_f F_t + H_v V_t + E_t \quad (11)$$

다음으로 고장검출을 위해 사용될 잔차는 식(12)와 같이 정의되고 각각의 고장에 대한 변환벡터는 잔차가 상태변수의 초기조건과 형태가 결정된 외란, 다른 고장에 대해 둔감하도록 $[O \mid H_u \mid H_f F^{-i}]$의 Null-Space에 대한 기저벡터(basis)로 설정한다.

$$r_{i,t} = W_i^T (Y_t - H_u U_t)$$
$$= W_i^T (H_f F_t + H_v V_t + E_t) \quad (12)$$

여기서 잔차들은 FIR 필터의 출력이기 때문에 갑작스런 고장에 대해 신속하게 반응한다는 것을 짐작할 수 있다. 시스템이 정상적으로 동작하는 경우 모든 잔차는 작은 값을 가지지만, 시스템에 이상이 발생한 경우에는 그로 인한 추가적인 외란의 영향을 받아 해당 잔차만이 현저하게 커지게 된다. 따라서 해석적 중복기법에 의한 각 잔차들의 변화를 통하여 대상 시스템에 서 고장의 발생여부와 원인을 신속하게 확인할 수 있다.

3.3 진단 알고리즘

각 잔차들은 식(12)에서 보는 바와 같이 고장 이외에도 시스템 잡음이나 관측 잡음에 의해서 반응할 수도 있으며 Steer-by-Wire 시스템과 같은 동적시스템의 경우, 제어입력의 순간적인 변화에도 반응할 수 있다. 따라서 이러한 요인들에 대한 잔차의 견실성을 확보하는 것이 필요하다.

앞 절에서 정의한 잔차는 가우시안 분포라고 볼 수 있으며 시스템 잡음과 관측 잡음의 공분산이 시불변이라고 가정하면 $Q_t = Q, R_t = R$이 된다. 따라서 $Cov(E_t) = I_L \otimes R$, $Cov(V_t) = I_L \otimes Q$으로 나타낼 수 있다. ($\otimes$는 Kronecker Product 연산) 만약 크기가 m인 고장이 발생한다면 $F_t = mF^i$이 되고 식(12)에 대입하여 (13)의 식을 얻을 수 있다.

$$(r_{i,t} \mid mf^i) = W_i^T (H_v V_t + E_t + mH_f F^i)$$
$$\in N(mW_i^T H_f F^i, W_i^T S W_i) \quad (13)$$

즉 단일 고장벡터 f^i는 각각의 변환벡터에 의해 공분산 $W_i^T S W_i$을 가진 $W_i^T H_f F^i$ 벡터로 패리티 공간에 맵핑된다. 확률적인 잡음에 대한 잔차들의 불확실성을 표준화하고 최소 분산을 가지도록 하기위해 (14)와 같은 표준화된 변환벡터과 잔차를 도입한다.

$$\bar{r}_{i,t} = (W_i^T S W_i)^{-1/2} r_{i,t}$$
$$= (W_i^T S W_i)^{-1/2} (Y_t - H_u U_t)$$
$$\overline{W}_i^T = (W_i^T S W_i)^{-1/2} W_i^T \quad (14)$$

결과적으로 단일 고장벡터는 표준화된 변환벡터들을 통해 (15)와 같은 분포를 가진다.

$$(\bar{r}_{i,t} \mid mf^i) \in N(m\overline{W}_i^T H_f F^i, I) \quad (15)$$

$$(\bar{r}_{i,t} \mid f^i = 0) \in N(0, I) \quad (16)$$

이를 바탕으로 고장 검출을 위한 가장 간단한 방법인 임계값 검사를 통해 각각의 고장 유무를 판단한다. 그러나 잡음이나 순간적인 변화를 무시할 수

없으므로 신뢰성 있는 잔차검사를 위해서는 필터링이 필요하다. 두 개의 임계값을 설정하고 식(18)을 이용하여 잔차를 0과 1사이의 범위에서 확률로 표현하고 식(19)의 EWMA 필터를 적용하여 고장판단에 있어서의 순간적인 영향을 줄이도록 하였다.

$$\mu_i(r_i(t), h_1^i, h_2^i) = \begin{cases} 0 & \text{if}(r_i(t) < h_1^i) \\ \dfrac{r_i(t) - h_1^i}{h_2^i - h_1^i} & \text{if}(h_1^i < r_i(t) < h_2^i) \\ 1 & \text{if}(r_i(t) > h_2^i) \end{cases} \quad (18)$$

$$\bar{r}_t = \gamma\ \bar{r}_{t-1} + (1-\gamma)\bar{r}_t \quad (0 < \gamma < 1) \quad (19)$$

h_1^i와 h_2^i은 위험 임계값와 신중 임계값을 의미하며 임계값은 잡음이 정규 분포이므로 이로부터 설정할 수 있다.

3.4 시뮬레이션

Steer-by-Wire 시스템의 감지기에 대한 해석적 중복기법의 타당성을 검증하기 위하여 다음과 같은 상황들을 시뮬레이션으로 모사하고 그에 따라 발생되는 필터링된 잔차의 궤적을 고찰하였다. 차량은 11.1(m/s) 의 일정한 속도로 주행 중이며 운전자에 의한 조향입력은 직진 주행, J-턴 주행, Lane-Change 주행, 그리고 Slalom 주행의 네 가지 경우로 설정하였다. 시뮬레이션을 수행할 때 모든 경우에 대하여 3.0(sec)에 고장이 발생한다고 가정하였다. 시간창 변수는 2로 선정하고 Steer-by-Wire 통합시스템의 모델링을 통해 필요한 행렬을 구할 수 있다. Table 1은 시뮬레이션에 관련된 신호들의 정보를 요약한 것이다. 입출력 신호에 대한 감지기와 상태변수에 대한 잡음은 모두 독립적인 가우시안 확률변수라고 가정하고 필터링을 위한 임계값은 정규분포로부터 설정할 수 있다. 또한 EWMA 필터의 γ는 0.4으로 선정하였다.

Table 1. Signals in Simulation. Size means the variance for the input, measurement noise variance for the output, state noise variance for the states and constant magnitude for the faults

signal	notation	meaning	size
input	u_1	current (A)	1
output	y_1	lateral velocity (m/s)	10^{-4}
	y_2	yaw rate (rad/s)	10^{-4}
	y_3	pinion angle (rad)	10^{-4}
disturb	d_1	friction Torque	-
state	x_1	lateral velocity (m/s)	0.1
	x_2	yaw rate (rad/s)	0.1
	x_3	pinion angle (rad)	0.1
	x_4	pinion angular velocity (rad/s)	0.1
fault	f_1	lateral velocity sensor	0.02
	f_2	yaw rate sensor	0.05
	f_3	pinion angle sensor	0.03

시뮬레이션의 결과, Fig 4.를 통하여 요속도 감지기에 이상이나 고장이 발생한 경우 해당 잔차만이 3(sec)에서 급격하게 반응함을 확인할 수 있다. 또한 Fig 5.를 통하여 조향각 감지기에 이상이나 고장이 발생한 경우, 3(sec)에서 즉각적으로 반응함을 알 수 있다. 이러한 잔차들을 고장진단을 위하여 필터링 처리를 하게 되면 좀더 신뢰성 있는 고장 검출이 가능하다. Fig 6.과 Fig 7을 통해 80(%)가 될 때를 검출의 기준으로 정하였다.

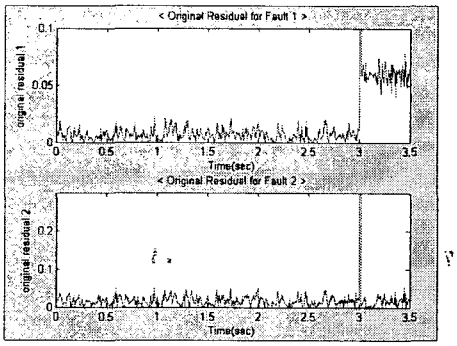

Fig 4. Simulated Residuals for 2.87 (?s) Yaw-rate bias shift

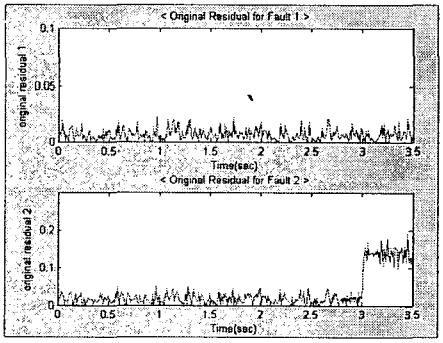

Fig 5. Simulated Residuals for 0.03 (rad) Pinion-angle bias shift

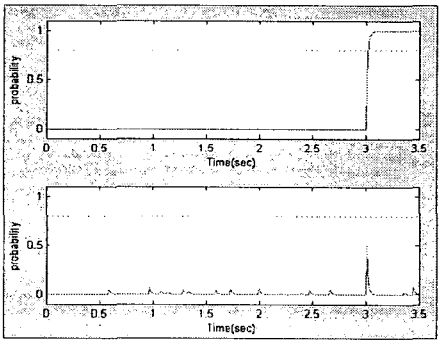

Fig 6. Decision output by Filtered Residuals for Yaw-rate Sensor Fault

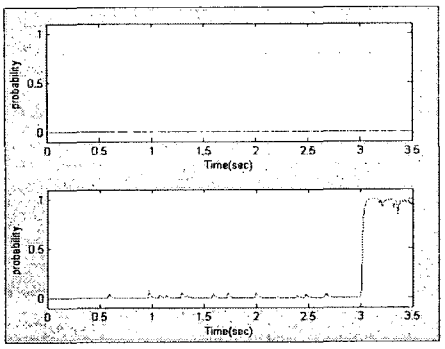

Fig 7. Decision output by Filtered Residuals for Pinion-angle Sensor Fault

4. 결론

본 논문에서는 해석적 중복기법을 응용한 Steer-by-Wire 시스템의 감지기 고장에 대한 진단 시스템을 제안하였다. 시스템 동작 중에 감지기에 발생할 수 있는 오프셋, 바이어스 현상이나 신호선의 단락과 같은 현상을 이상신호로 나타내었다.

해석적 중복을 구현하기 위해 패리티 공간기법을 적용하고 고장 진단의 기본 정보인 잔차를 각각의 고장에 대해 구하였다. 그리고 잔차에서 나타날 수 있는 잡음과 순간적인 변화에 대한 반응을 분석하여 이를 억제하고 고장을 효과적으로 검출할 수 있는 방법을 제안하였다. 추후 제안된 진단 시스템의 실험적 검증 및 고장 허용 제어에 관한 연구를 수행할 예정이다.

후기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구 지원으로 수행되었음 (과제번호: R01-2003-000-10109-0)

참고문헌

1. Anna. Hagenblad, Fredrik Gustafsson, Inger Klein, " A Comparison of Two Methods for Stochastic Fault Detection"
2. Fredrik Gustafsson, "Stochastic Observability and Fault Diagnosis of Additive Change in State Space Models", IEEE, 2001
3. Rolf Isermann, "Model-Based Fault Detection and Diagnosis - Status and Application", IFAC, 2004
4. Edward C. Larson, B. Eugene Parker, Brian R. Clark, "Model-Based Sensor and Actuator Fault Detection and Isolation", Proceedings of American Control Conference Anchorage, 2002
5. S. Amberkar, F. Bolourchi, J.Demerly, S. Millsap, "A Control System Methodology for Steer-by-Wire Systems", SAE World Congress Detroit, 2004
6. C. D. Gadda, Pual Yih, J. C. Gerdes, "Incorporating a Model of Vehicle Dynamics in a Diagnostic System for Steer-by-Wire Vehicles", In Proceedings of International Symposium on AVEC, 2004
7. L. J. de Miguel, Margarita Mediavilla, J.R. Peran, "Fault Diagnosis System Based on Sensitivity Analysis and Fuzzy Logic", IEEE, 1996