

Parity space 방법을 통한 EMB 고장 진단 알고리즘 개발

성시현¹⁾, 최세범^{*1)}, 현동윤²⁾

한국과학기술원 기계공학과¹⁾ 현대자동차 샤시제어개발팀²⁾

Development of Fault Detection and Isolation Algorithm for Electro-Mechanical Brake systems using Parity Space Approach

Sihyun Seong¹⁾ · Seibum Choi^{*1)} · Dongyoon Hyun²⁾

¹⁾ Department of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology,
291 Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34141, Republic of Korea

²⁾ Chassis System Control Development Team, Hyundai Motor Company, 150 Hyundaiyeonguso-ro, Namyang-eup,
Hwaseong-si, Gyeonggi 18280, Republic of Korea

Abstract : Brake By Wire 시스템은 기존의 유압브레이크보다 빠른 응답속도를 가지며, ABS, TCS, ESC, ISG, ACC와 같은 다른 샤시 제어시스템과 연계하기 쉽다. 또한 기존의 유압 라인을 제거함으로써 차량의 공간을 더 효율적으로 사용할 수 있으며 브레이크 오일을 사용하지 않으므로 친환경적이라 할 수 있다. 하지만 기존의 유압브레이크와 달리 BBW는 기계적인 backup 시스템이 없기 때문에 신뢰성 부분에서 취약하다. 따라서 본 논문에서는 BBW시스템에서 사용되는 Electro-Mechanical Brake의 모델링 한 뒤 전류 센서, 클램핑력 센서, 각속도 센서의 고장을 Parity space approach를 통해 진단하는 방법을 제안하였다. 또한 Parity space approach를 통해 구한 residual을 분석하여 fault isolation을 수행하였으며, 일반적으로 사용되는 EMB Closed-loop 제어로직에서 fault injection 시뮬레이션을 통해 EMB 고장 진단 알고리즘을 검증하였다.

Key words : Electro-Mechanical Brake(전동식 브레이크), Fault Detection and Isolation (고장 검출 및 분류), additive sensor fault(센서 고장), Residual generator(Residual 생성기)

Nomenclature

i : motor current, A
 R : stator resistance, Ω
 L : inductance, H
 N_p : number of pole pairs
 ψ_{af} : flux linkage
 θ_m : motor angle, rad
 ω_s, ω_m : synchronous/motor angular velocity, rad/s
 T_m : motor torque, Nm
 T_L : load torque, Nm
 T_{rs} : friction torque, Nm

K_t : motor torque constant, Nm/A
 F_{cl} : clamping force, N
 J : inertia moment of motor, kgm^2
 η : efficiency of ball screw
 d, q : d-axis, q-axis

1. 서론

최근 자동차 산업 동향을 보면 운전자의 편의성을 제공하기 위하여 샤시 제어 시스템에서 기존의 유압 시스템 대신에 X-By-Wire 시스템을 도입

* 성시현, E-mail: go4090@kaist.ac.kr

하려는 시도가 늘고 있다. X-By-Wire 시스템이란 기계적 연결 혹은 유압 연결을 제거하고 전기적 신호로 대체하는 것을 의미한다. 이와 같은 추세로 Brake-By-Wire 시스템 또한 주목받고 있다. Brake-By-Wire 시스템은 기존의 유압 연결 대신에 전동식 브레이크를 통해 차량을 제동하는 시스템을 의미한다. 유압 라인, Vacuum booster 및 기계 링크를 제거함으로써 차량의 엔진룸과 차량 하부에 공간적인 여유를 확보할 수 있으며 Adaptive cruise control 및 Electronic brake force distribution과 같은 시스템과 연동이 쉬워진다. 이 외에도 모터의 빠른 응답성을 통해 제동거리가 감소되며, 유압 장치의 오일이 필요하지 않으므로 환경적으로도 많은 장점이 있다.

이와 같은 BBW시스템의 상용화를 위해서는 신뢰성 문제가 해결되어야 한다. 기존의 유압방식의 브레이크와 달리 Electro-Mechanical Brake (EMB)는 기계적인 back up 시스템이 없기 때문에 EMB가 고장 날 경우 치명적인 사고를 일으킬 수 있다. 따라서 Fault Detection and Isolation (FDI) 알고리즘 및 Fault Tolerant Control이 매우 중요하다. 고장 진단(FDI) 알고리즘은 크게 관측기 기반 방식과 parity space 방식으로 나뉜다. 관측기 기반 방식은 모델 관측기를 통해 residual을 생성하여 고장 진단을 하는 방식이며 parity space방식은 시스템의 입력과 출력에 parity vector를 곱하여 residual을 생성한 뒤 고장 진단을 한다. 본 연구에서는 일반적으로 EMB제어에 사용되는 q축 전류 센서, 클램핑력 센서, 모터 각속도 센서의 고장을 Parity space 방식으로 고장 진단하고 fault injection 시뮬레이션을 통해 고장 진단 알고리즘을 검증하였다.

2. EMB 시스템 모델링

EMB 시스템은 전기모터로 구성된 전기적 시스템과 볼 스크류, 브레이크 캘리퍼 및 패드로 구성된 기계적 시스템이 있다.

2.1 EMB 전기적 시스템 모델링

본 연구에서 EMB를 구동시키기 위한 전기모터로서 Permanent Magnet Synchronous Motor(PMSM)을 사용하였다. 3상 전원이 입력되면 Clarke 변환과

park변환을 통해 회전하는 기준축인 d축, q축에 대한 전원 값으로 변환된다.

$$\begin{bmatrix} f_\alpha \\ f_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} f_d \\ f_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_\alpha \\ f_\beta \end{bmatrix} \quad (2)$$

이를 통해서 PMSM의 d축 및 q축의 전압방정식은 식(3), (4), (5)와 같다.

$$v_d = Ri_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega_s L_q i_q \quad (3)$$

$$v_q = Ri_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega_s (L_d i_d + \psi_{af}) \quad (4)$$

$$\omega_s = N_p \omega_m \quad (5)$$

모터 토크는 식(6)과 같이 유도된다.

$$T_m = \frac{3}{2} N_p [\psi_{af} i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \quad (6)$$

d축 전류는 자속 성분에 해당되며 q축 전류는 토크 성분에 해당된다. 그러므로 PMSM의 최대 모터 토크를 발생시키기 위해서는 d축의 전류가 0이 되도록 제어해야한다. 이 때 최대 모터 토크는 식(7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_m = \frac{3}{2} N_p \psi_{af} i_q = K_t i_q \quad (7)$$

2.2 EMB 기계적 시스템 모델링

볼스크류, 브레이크 캘리퍼 및 패드로 구성된 EMB의 기계적 시스템은 다음과 같이 모델링 될 수 있다.

$$T_m = T_L + J \frac{d}{dt} \omega_r + T_{rs} \quad (8)$$

$$T_L = \frac{p_s}{2\pi\eta} F_{cl} \quad (9)$$

$$T_{rs} = B\omega_m \quad (10)$$

식(9)는 부하토크를 의미하며 η 는 볼스크류에 의해 전달되는 효율이며 식(10)은 마찰, 점성에 의한 저항이다. 부하토크는 식(9)과 같이 클램핑력에 대한 함수로 나타낼 수 있다.

이 때 클램핑력은 Figure1와 같이 모터각의 다항식으로 표현 될 수 있다는 기존의 연구를 바탕으로 다음과 같이 모델링하였다.

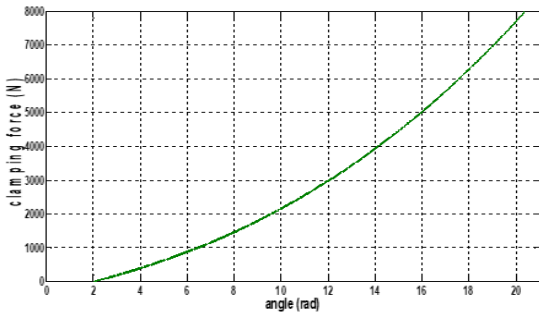


Figure 1 Motor angle versus Clamping force

$$F_{cl} = K_1\theta_m + K_2\theta_m^2 + K_3\theta_m^3 + \dots \quad (11)$$

선형 시스템의 FDI기법을 적용하기 위해 (11)을 식(12)와 같이 외란을 가진 선형모델로 모델링하였다.

$$F_{cl} = K_1\theta_m + \Delta F_{cl} \quad (12)$$

EMB의 전기적, 기계적 시스템을 상태방정식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_q \\ \dot{F}_{cl} \\ \dot{\omega}_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L_q} & 0 & -\frac{2K_t}{3L_q} \\ 0 & 0 & K_1 \\ \frac{K_t}{J} & -\frac{p_s}{2\pi\eta J} & -\frac{B}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_q \\ F_{cl} \\ \omega_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_q} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} V_q + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \Delta \dot{F}_{cl}$$

$$\begin{bmatrix} i_q \\ F_{cl} \\ \omega_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_q \\ F_{cl} \\ \omega_m \end{bmatrix} \quad (13)$$

3. 고장 모델링

3.1 고장 모델링

EMB 시스템의 일반적인 제어 로직은 Figure2와 같다. 본 연구에서는 EMB 시스템 제어에 사용되는 q 축 전류 센서, 클램핑력 센서, 모터 각속도 센서의 고장을 진단하려고 한다. 각 센서들의 고장은 additive fault라 가정하고 식(14)와 같이 모델링하였다.

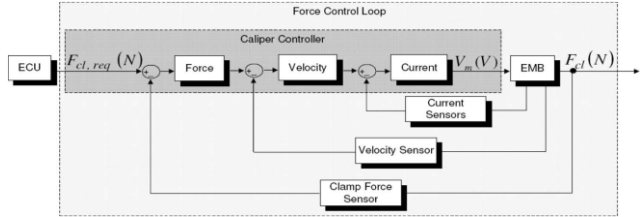


Figure 2 EMB clamp force control architecture

EMB시스템과 고장의 모델은 다음과 같이 표현 될 수 있다.

$$\begin{aligned} i_{q_m} &= i_q + f_1 \\ F_{cl_m} &= F_{cl} + f_2 \\ \omega_{m_m} &= \omega_m + f_3 \end{aligned} \quad (14)$$

$$x = \begin{bmatrix} i_q \\ F_{cl} \\ \omega_m \end{bmatrix}, u = V_q, f = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{bmatrix}$$

$$\dot{x} = Ax + Bu + E_x d + F_x f$$

$$y = Cx + F_y f$$

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L_q} & 0 & -\frac{2K_t}{3L_q} \\ 0 & 0 & K_1 \\ \frac{K_t}{J} & -\frac{p_s}{2\pi\eta J} & -\frac{B}{J} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_q} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, E = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, F_x = 0, F_y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

위의 state-space 방정식을 다음과 같이 전달함수로 나타낼 수 있다.

$$G_{yu} = C(sI - A)^{-1}B \quad (16)$$

$$G_{yd} = C(sI - A)^{-1}E_x \quad (17)$$

$$G_{yf} = C(sI - A)^{-1}F_x + F_y \quad (18)$$

4. 고장 진단 알고리즘 개발

4.1 Parity space를 이용한 residual 생성

EMB 시스템 및 고장 모델은 선형 모델이므로 Parity space 방법을 통해 residual을 생성하였다. residual 생성기의 구조는 Figure 4와 같다.

$$\begin{aligned} r &= V_{ru}(s)u(s) + V_{ry}y(s) \\ &= V_{ru}(s)u(s) + V_{ry}(G_{yu}u(s) \\ &\quad + G_{yd}d(s) + G_{yf}f(s)) \quad (19) \end{aligned}$$

residual이 입력과 외란에는 영향을 받지 않고 fault에만 영향을 받도록 해야 하므로 식(20), 식(21)과 같이 $V_{ru}(s), V_{ry}(s)$ 를 설계하여야 한다.

$$V_{ru}(s) + V_{ry}(s)G_{yu}(s) = 0 \quad (20)$$

$$V_{ry}(s)G_{yd}(s) = 0 \quad (21)$$

위의 식을 바탕으로 residual 생성하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$r(s) = V_{ry}G_{yf}f(s) \quad (22)$$

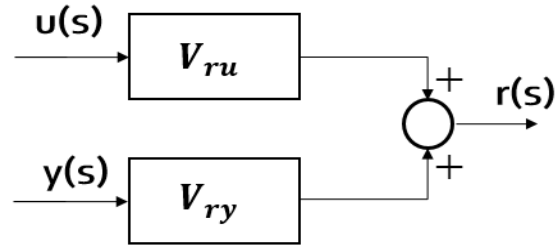


Figure 4 Residual 생성기

4.2 Residual 평가

센서의 fault가 존재 할 때 residual 평가를 통해 어떤 센서가 고장이 있는지 구분 할 수 있어야 한다. 이를 fault isolation이라 하며 table1을 통해 각 센서 고장에 대한 fault isolation을 수행할 수 있다.

Table 1 fault에 대한 Residual의 영향

	f_1	f_2	f_3
r_1	0	×	0
r_2	0	0	×
r_3	×	0	0

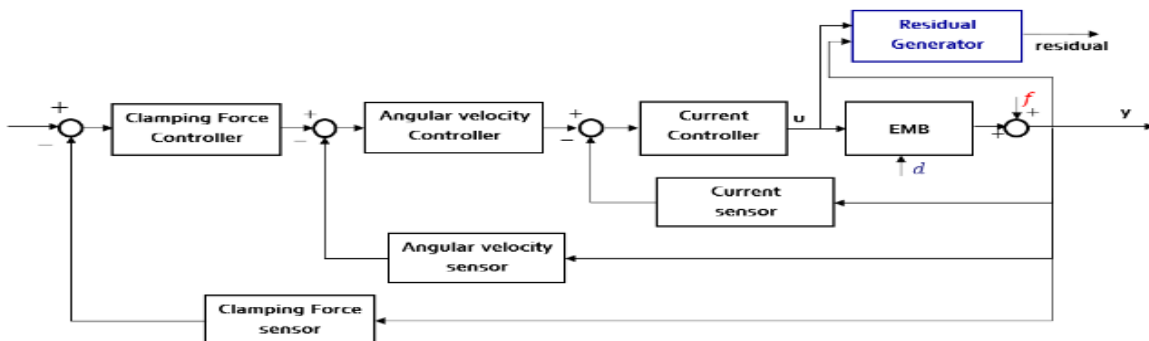


Figure 3 EMB 고장 진단 알고리즘

5. Fault injection 시뮬레이션

시뮬레이션에 사용된 전동기의 파라미터들은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} R &= 0.0048\Omega & L_q &= 0.05mH \\ K_t &= 0.028Nm / A & B &= 0.0006 Nm \cdot s / rad \\ p_s &= 0.0036m & \eta &= 0.9 \\ J &= 0.00002kgm^2 \end{aligned}$$

Injection된 fault의 크기는 figure 5,6,7과 같다.

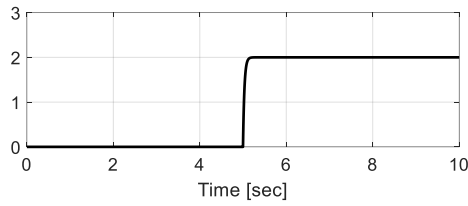


Figure 5 2A additive fault at 5sec

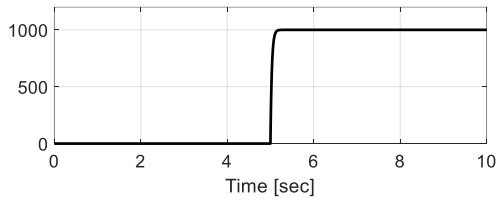


Figure 6 1000N additive fault at 5 sec

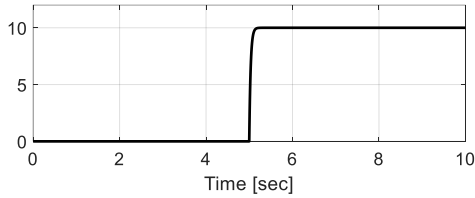


Figure 7 10 rad/s additive fault at 5 sec

먼저 fault가 없는 경우 생성된 residual은 다음과 같다.

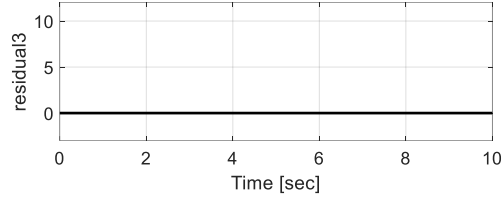
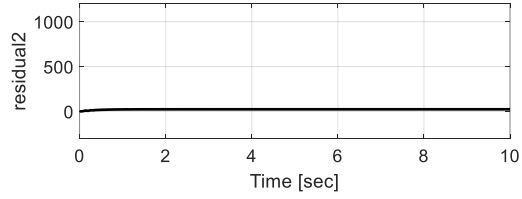
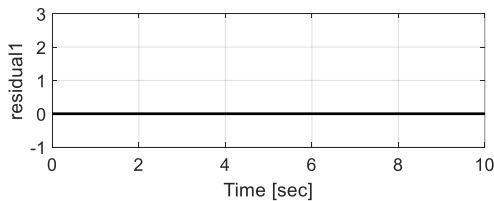


Figure 8 fault가 없을 때의 residual값

residual 1,3은 0에 가깝게 나오는 것을 확인 할 수 있다. residual2는 약 20정도로 나오는데 이러한 현상이 생기는 이유는 클램핑력은 모터각에 대해 비선형적 함수를 갖는데 이를 선형화함으로써 생기는 model uncertainty 때문이다. 하지만 residual2의 20정도의 크기는 sensor fault가 생겼을 때의 발생하는 residual2에 비해 매우 작으므로 FDI알고리즘에 크게 영향을 주지 않는다.

5.1 전류 센서의 additive fault injection

전류 센서에 figure 5와 같은 fault를 주입 하였을 때 residual은 다음과 같다.

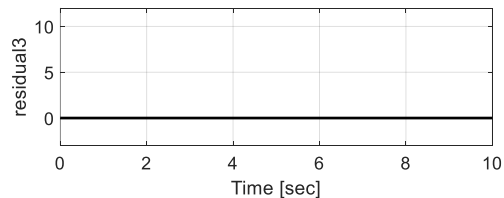
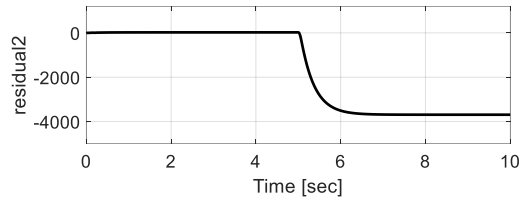
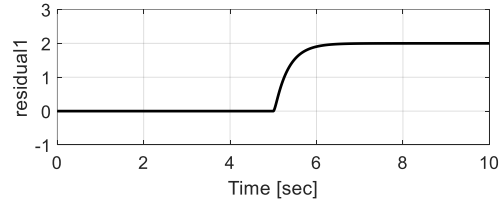


Figure 9 전류 센서 fault injection시 residual

Table 1과 같이 residual1과 residual2가 검출되는 것을 확인 할 수 있다.

5.2 클램핑력 센서의 additive fault injection

클램핑력 센서에 figure 6와 같은 fault를 주입 하였을 때 residual은 다음과 같다.

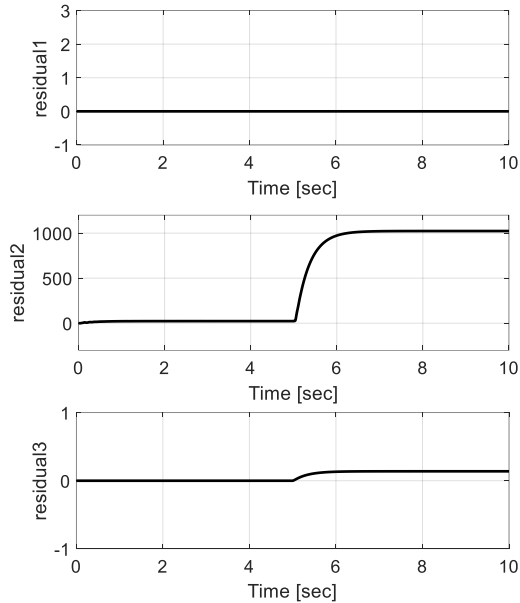


Figure 10 클램핑력 센서 fault injection시 residual

Table 2과 같이 residual2과 residual3이 검출되는 것을 확인 할 수 있다.

5.3 각속도 센서의 additive fault injection

각속도 센서에 figure 7와 같은 fault를 주입 하였을 때 residual은 다음과 같다.

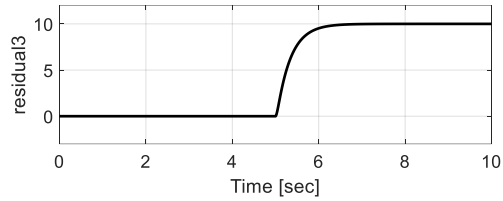
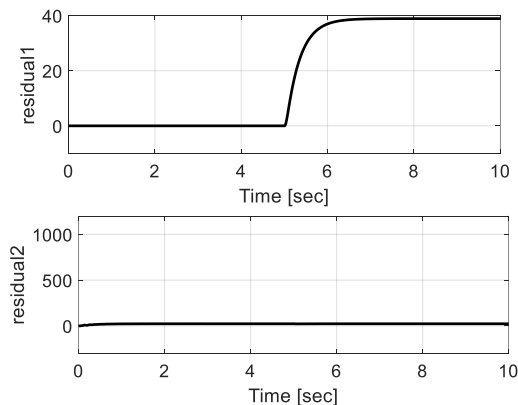


Figure 11 각속도 센서 fault injection시 residual

Table 3과 같이 residual3과 residual1이 검출되는 것을 확인 할 수 있다.

6. 결론

본 연구에서는 Brake by wire 시스템의 신뢰성 향상을 위하여 parity space approach를 통해 고장 진단 알고리즘을 제안하였다. EMB 제어로직에 사용되는 3개의 센서의 additive fault를 residual 생성기를 통해 residual을 생성하고 이를 통해 고장 진단 및 isolation 하였다. 또한 시뮬레이션을 통해 고장 진단 알고리즘을 검증하였다. Brake by wire 시스템의 클램핑력 센서, q축 전류 센서, 모터 각속도 센서의 고장들은 시뮬레이션에서 residual의 변화를 통해 검출 및 isolation 할 수 있었다.

본 논문은 현대자동차의 지원으로 작성되었습니다

References

- 1) Schwarz, Ralf, et al. *Modeling and control of an electromechanical disk brake*. No. 980600. SAE Technical Paper, 1998.
- 2) Giseo Park, Seibum B. Choi, "Clamping Force Control Based on Dynamic Model Estimation for Electromechanical Brakes", Part D: Journal of Automobile Engineering, Vol. 231, No. 14, 2000-2013, December 2018
- 3) Giseo Park, Seibum Choi, Dongyoon Hyun, "Clamping Force Estimation Based on Hysteresis Modeling for Electro-Mechanical

Brakes" International Journal of Automotive Technology, Volume 18, No. 5, pp. 883-890, 2017

- 4) Hwang, Woohyun, and Kunsoo Huh. "Fault detection and estimation for electromechanical brake systems using parity space approach." *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control* 137.1 (2015): 014504.
- 5) Ding, Steven X. *Model-based fault diagnosis techniques: design schemes, algorithms, and tools*, pp. 97-102, Springer Science & Business Media, 2008.
- 6) Isermann, Rolf, Ralf Schwarz, and Stefan Stolz. "Fault-tolerant drive-by-wire systems." *IEEE Control Systems Magazine* 22.5 (2002): 64-81.