

슬라이딩 모드 관측기 기반 전지형 크레인의 조향입력 고장검출 알고리즘 Sliding Mode Observer-based Fault Detection Algorithm for Steering Input of an All-Terrain Crane

오광석¹ · 서자호^{2*}

Kwangseok Oh and Jaho Seo

Received: 11 Mar. 2017, Revised: 21 Apr. 2017, Accepted: 30 May. 2017

Key Words : Sliding mode observer(슬라이딩 모드 관측기), Steering system(조향시스템), Fault detection(고장검출), Fault signal reconstruction(고장신호재건), Crane model(크레인 모델)

Abstract: This paper presents a sliding mode observer-based fault detection algorithm for steering inputs of an all-terrain crane. All-terrain cranes with multi-axles have several steering modes for various working purposes. Since steering angles at the other axles except the first wheel are controlled by using the information of steering angle at the first wheel, a reliable signal of the first axle's steering angle should be secured for the driving safety of cranes. For the fault detection of steering input signal, a simplified crane model-based sliding mode observer has been used. Using a sliding mode observer with an equivalent output injection signal that represents an actual fault signal, a fault signal in steering input was reconstructed. The road steering mode of the crane's steering system was used to conduct performance evaluations of a proposed algorithm, and an arbitrary fault signal was applied to the steering angle at the first wheel. Since the road steering mode has different steering strategies according to different speed intervals, performance evaluations were conducted based on the curved path scenario with various speed conditions. The design of algorithms and performance evaluations were conducted on Matlab/Simulink environment, and evaluation results reveal that the proposed algorithm is capable of detecting and reconstructing a fault signal reasonably well.

기호 설명

v_y : lateral velocity, m/s

ψ : yaw angle, rad

v_x : longitudinal velocity, m/s

C_i : cornering stiffness of i^{th} wheel, N/rad

I_z : rotational inertia, kgm^2

T_c : transformation matrix

δ_i : i^{th} steering angle, rad

v : injection term

D : fault distribution matrix

L : design freedom for sliding mode observer

v_{eq} : equivalent output injection

f : fault signal, rad

f_r : reconstructed fault signal, rad

l_i : distance between mass center and i^{th} axle, m

* Corresponding author: seojaho@cnu.ac.kr

1 Department of Automotive Engineering, Honam University, 417 Eodeung-daero, Gwangsan-gu, Gwangju, 62399, Korea

2 Department of Biosystems Machinery Engineering, Chungnam National University, 99 Daehangno, Yuseong-gu, Daejeon, 34134, Korea

Copyright © 2017, KSFC

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서 론

본 논문의 연구대상인 다축 전지형 크레인은 다양한 목적에 따른 작업을 수행하는 특수목적 중장비이

며 5축 조향시스템을 갖추고 있다. 작업을 수행하기 위해 작업장치와 목적에 맞는 다양한 조향모드(all wheel steering, crab steering, road steering mode 등)가 있으며 2, 3, 4, 5축 조향 휠은 운전자 입력인 1축 조향입력 신호를 기반으로 조향각이 결정된다. 즉, 1축 조향각이 센서에 의해 계측되고 크레인의 주행속도 및 조향모드별 1축과 3, 4, 5축간 조향각 관계를 기반으로 각 축의 조향각이 전자유압시스템을 이용하여 제어된다. 그러므로 1축 조향입력 신호가 고장신호에 의해 조향시스템으로 정확히 전달되지 않는다면 나머지 3,4,5축 조향각의 결정에 오류가 발생할 수 있다. 이러한 조향시스템의 고장은 크레인의 작업 효율을 저하시킬 뿐 아니라 60 kph이상의 속도로 고속주행이 가능한 크레인의 치명적 사고를 유발할 수 있다. 이러한 문제를 해결하고 대상 시스템의 안전성을 확보하기 위해 고장신호의 검출 및 허용제어에 관한 다양한 연구가 수행되고 있다.

Li는 interval type-2(IT2) Takagi-Sugeno(T-S) fuzzy 시스템을 위한 새로운 fuzzy 관측기 기반 센서 고장 검출 기술을 제안하였다.¹⁾ Zhu는 finite frequency domain에서 차량의 능동현가시스템의 고장검출 필터 설계에 관한 연구를 수행하였다.²⁾ Yin은 비선형 특성을 갖는 풍력 발전용 터빈의 데이터 구동 기반 외란에 강건한 고장검출 알고리즘을 제안하였다.³⁾ 그리고 Shao는 슬라이딩 모드 관측기와 half-bridge의 스위칭 모델을 이용하여 modular multilevel converter를 위한 고장검출 알고리즘을 제안하였다.⁴⁾

고장검출을 위해 일반적으로 다양한 observer가 사용되고 있으며 본 연구에서는 크레인의 조향입력의 고장검출을 위해 모델기반 슬라이딩 모드 관측기를 적용하였다. 사용된 모델은 크레인의 bicycle model 기반 단순화된 수학적 모델이며 대상 크레인의 실제 조향시스템을 모사하였다. 고장신호 검출을 위해 관측기의 equivalent output injection을 이용하여 고장신호를 도출하였으며 합리적 성능평가를 위해 곡선 일반도로로 주행상황에서 임의의 고장신호를 인가하였다. 본 논문은 아래와 같이 구성되었다.

2장에서는 대상 크레인의 조향시스템에 대해 기술하고, 3장은 슬라이딩 모드 관측기 기반 고장검출 알고리즘 설계에 대해 기술한다. 4장과 5장은 각각 제안된 알고리즘의 성능평가 결과와 결론에 대해 기술한다.

2. 다축 전지형 크레인의 조향시스템

본 연구에서 대상으로 하는 다축 전지형 크레인은 60톤급 5축 크레인이며 일반주행 시 사용되는 road steering mode가 고장검출 알고리즘 개발을 위한 조향시스템으로 적용되었다. road steering mode에서는 1축 휠의 수직 연장선과 고정된 3축 휠의 수직 연장선이 만나는 점을 steering pole로 정의함으로써 ackerman steering 기반 나머지 2, 4, 5축 휠의 조향각이 결정된다. 2축 휠의 조향각은 1축 휠과 기계적 연결을 통해 결정되며 3축은 항상 고정된다. 4축과 5축 휠은 1축과 3축이 만드는 steering pole과 일치될 수 있도록 조향각이 결정되며 크레인의 종방향 속도 크기에 따라 순차적으로 고정된다. Table 1과 Fig. 1은 크레인의 속도 구간별 조향가능 여부 및 축간 조향 관계를 보여준다.

Table 1 Steering strategy: road steering mode

Longitudinal speed region	Steering wheels				
	1 st	2 nd	3 rd	4 th	5 th
~ 30 kph	Driver input	Connected to 1 st axle	Fixed	<i>steerable</i>	<i>steerable</i>
30 ~ 60 kph			Fixed	Fixed	<i>steerable</i>
60 kph ~			Fixed	Fixed	Fixed

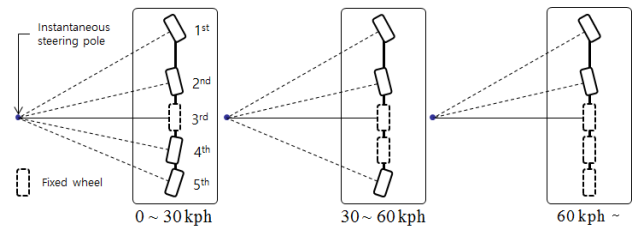


Fig. 1 Steering strategy: geometrical analysis

2,3,4,5축 휠의 조향각은 앞서 기술된 것과 같이 1축과 3축 휠이 만드는 steering pole을 기준으로 결정되며 2, 3, 4, 5축 휠이 1축 휠과 이루는 조향각 관계를 나타내면 Fig. 2와 같이 선형적으로 나타낼 수 있다.

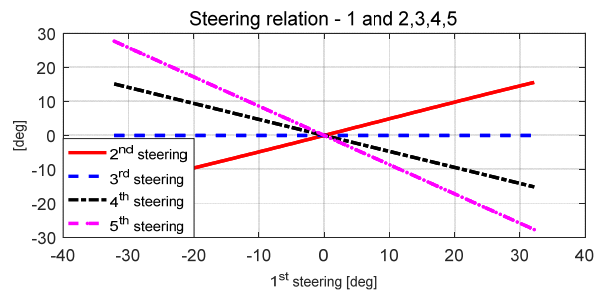


Fig. 2 Relation between: 1st and 2nd, 3rd, 4th, 5th

Fig. 2는 실제 크레인의 축간 조향각의 관계를 계측하여 관계를 도출한 결과이며 1축 조향각과 다른 축의 조향각과의 관계는 선형적 관계라는 것을 확인할 수 있었다. 다음 절에서는 고장검출 알고리즘에 대해 기술한다.

3. 고장검출 알고리즘 설계

크레인의 1축 조향입력에 대한 고장신호 검출을 위해 모델 기반 슬라이딩 모드 관측기를 적용하였다. 모델은 bicycle model 기반 수학적으로 도출된 크레인 모델이 사용되었으며 도출된 수학적 모델은 아래와 같은 상태공간방정식으로 표현된다.

$$\dot{x} = Ax + B_0u \tag{1}$$

여기서 x 는 상태변수, A 는 시스템행렬, B_0 는 입력행렬을 나타내며 아래와 같이 정의된다.⁵⁾

$$x = [v_y \dot{\psi}]^T \tag{2}$$

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{2}{m} \sum_{i=1}^5 C_i & -v_x - \frac{2}{mv_x} \left(\sum_{i=1}^2 C l_i - \sum_{i=3}^5 C l_i \right) \\ -\frac{2}{I_z} \left(\sum_{i=1}^2 C l_i - \sum_{i=3}^5 C l_i \right) & -\frac{2}{I_z v_x} \sum_{i=1}^5 C l_i^2 \end{bmatrix} \tag{3}$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{2C_1}{m} & \frac{2C_2}{m} & \frac{2C_3}{m} & \frac{2C_4}{m} & \frac{2C_5}{m} \\ \frac{2l_1 C_1}{I_z} & \frac{2l_2 C_2}{I_z} & \frac{2l_3 C_3}{I_z} & \frac{2l_4 C_4}{I_z} & \frac{2l_5 C_5}{I_z} \end{bmatrix} \tag{4}$$

u 는 각 휠의 조향각 $\delta = [\delta_1 \delta_2 \delta_3 \delta_4 \delta_5]^T$ 이다. 운전자 조향입력의 고장신호를 검출하기 위해 2,3,4,5축 조향각은 1축 조향각을 이용하여 속도 구간별 선형적 관계로 도출할 수 있으며 아래 수식과 같다.

$$\dot{x} = Ax + B_0 M \delta_1 = Ax + B \delta_1 \tag{5}$$

수식 (5)의 M 은 속도의 구간에 따라 달라지는 조향전략을 반영할 수 있도록 30 kph 미만의 경우 $M = [10.480 - 0.47 - 0.86]^T$, 30 ~ 60 kph의 경우 $M = [10.4800 - 0.86]^T$, 60 kph 이상의 경우 $M = [10.48000]^T$ 로 정의되었다. 일정한 속도 기반 크레인 모델을 이용한 슬라이딩 모드 관측기 기반 고장검출을 위한 모델 개략도는 Fig. 3와 같다.

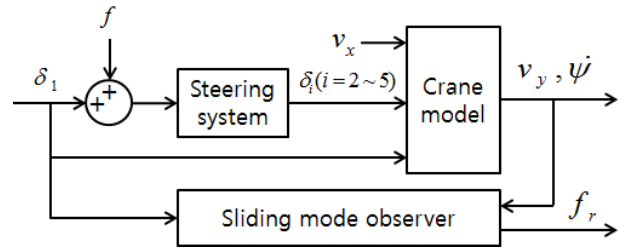


Fig. 3 Model schematics for fault-detection

운전자의 조향입력에 대해 시스템 내부적으로 발생 가능한 고장신호 f 와 fault distribution matrix D 를 이용하여 수식(5)의 상태공간 방정식을 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$\dot{x} = Ax + B\delta_1 + Df \tag{6}$$

조향입력신호를 재건하기 위해 fault distribution matrix D 는 B 와 같은 값으로 정의되었으며 슬라이딩 모드 관측기의 설계를 위해 크레인의 lateral velocity와 yaw rate가 계측 가능하다는 가정 하에 출력 y 를 정의하였다.

$$y = Cx, C = [1 \ 1] \tag{7}$$

슬라이딩 모드 관측기 설계를 위해 아래와 같은 형태의 관측기 수식을 정의하였다.

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + B\delta_1 + G_n v \tag{8}$$

오차 $e_y = C(\hat{x} - x)$ 의 슬라이딩 모드 서피스 $S = \{e_y : e_y = 0\}$ 로 유한시간 내 수렴시키기 위해 injection term(v)와 coordinate transformation matrix(T_c)를 아래와 같이 정의하였다.

$$v = \rho \text{sign}(e_{y,i}), i = 1, 2, \dots, p \tag{9}$$

$$T_c = [N_c^T C]^T \tag{10}$$

N_c 는 행렬 C 의 null space를 나타내는 행렬이며 p 는 관측행렬 C 의 행의 크기를 나타낸다. Coordinate transformation($x_c = T_c x$)에 의해 정의된 수식 (6)는 아래 수식과 같이 변환될 수 있다.

$$\dot{x}_c = T_c A T_c^{-1} x_c + T_c B \delta_1 + T_c D f \tag{11}$$

수식의 시스템과 입력 그리고 고장신호 분산행렬을 각각 $A_c = T_c A T_c^{-1}$, $B_c = T_c B$, $D_c = T_c D$ 로 정의하고 수식(8)을 이용하여 error dynamics를 아래와 같이 도출할 수 있다.

$$\dot{e} = A_c e + G_n v - D_c f \quad (12)$$

도출된 error dynamics를 coordinate transformation에 의해 구분된 행렬로 표현하면 출력오차와 나머지 상태변수에 대해 아래와 같이 표현될 수 있다.

$$\dot{e}_1 = A_{c11} e_1 + A_{c12} e_y + G_1 v - D_{c1} f \quad (16)$$

$$\dot{e}_y = A_{c21} e_1 + A_{c22} e_y + G_2 v - D_{c2} f \quad (17)$$

초기 슬라이딩 모드 관측기가 수렴하기 전까지는 fault signal이 0이라는 가정 하에 수식(14)과 수식(12) 그리고 $G_n = [L I_p]^T$ 을 이용하면 출력 오차 e_y 는 eta-reachability condition에 의해 유한시간 내 0으로 수렴하는 성능을 확보할 수 있다.⁶⁾ 관측오차의 수렴 후 수식(13)은 아래와 같이 정리된다.

$$\dot{e}_1 = (A_{c11} + L A_{c21}) e_1 \quad (14)$$

위 수식에서 $(A_{c11} + L A_{c21})$ 이 항상 negative definite이 될 수 있도록 L을 설계하면 e_1 이 항상 수렴하는 조건이 성립하게 된다. 설계된 L과 수식(8)을 이용하여 슬라이딩 모드 관측기를 구성할 수 있다. 하지만 관측오차의 수렴 이후 고장신호 f 가 발생된다면 신호를 검출하기 위해 재건해야 한다. 이를 위해 재건된 고장신호 f_r 와 $e_1 \approx e_y \approx 0$ 를 이용하여 수식(14)을 정리할 수 있다.

$$f_r = (D_{c2}^T D_{c2})^{-1} D_{c2}^T G_2 v_{eq} \quad (15)$$

재건된 고장신호 f_r 은 고장검출을 위한 신호로서 본 연구에서 다양한 시나리오에서 합리적인 검출 신호가 재건될 수 있음을 확인할 수 있었다. 수식(15)의 변환된 D_{c2} 는 관측행렬 C 의 행 크기가 1이므로 1차원 상수값을 갖는다. 다음 절에서는 제안된 슬라이딩 모드 관측기 기반 고장검출 알고리즘의 성능평가 결과를 기술한다.

4. 성능평가

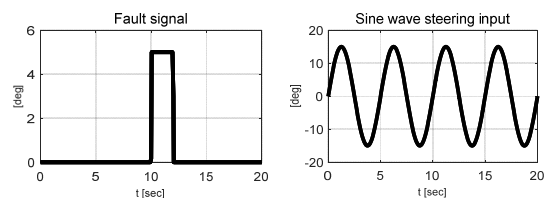
성능평가를 위해 60톤급 크레인 모델과 제안된 고장진단 알고리즘을 Matlab/Simulink 환경에서 구성하였으며 평가는 임의의 고장신호와 함께 아래의 세 가지 시나리오(속도 65 kph)에서 수행되었다.

Scenario - 1: 조향입력 없는 직진 주행

Scenario - 2: 조향입력(정현파) 있는 주행

Scenario - 3: 운전자모델 기반 곡선로 주행

적용된 고장신호는 일정 시간동안 사각파 형태의 신호가 인가되어 재건된 고장신호와 비교되었고, Fig. 4는 인가된 고장신호, 정현파 형태의 조향입력, 그리고 성능평가 시 적용된 곡선로를 보여준다.



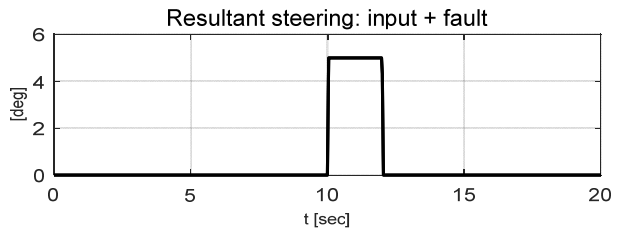
(a) fault signal and sine wave steering input

(b) Reference curved path for evaluation: R = 90 m
Fig. 4 fault signal, sine wave steering input, and curved path for performance evaluation

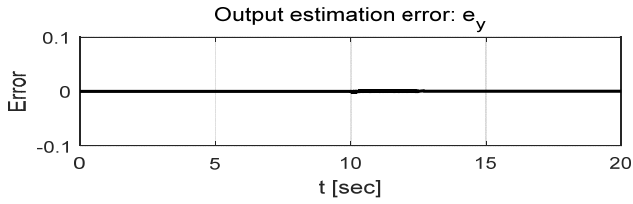
Fault signal은 크기 5 deg를 갖는 사각파가 적용되었고, 시나리오 (1)과 (2)에서는 20초 중 10초부터 2초간 인가되었으며 시나리오 (3)에서는 약 50초 중 25초부터 2초간 인가되도록 구성되었다. 다음은 각 시나리오 별 성능평가 결과를 나타낸다.

시나리오 (3)에서 적용된 운전자 모델은 전방도로 정보를 이용하여 조향각을 결정하는 횡방향 운전자 모델로써 Model Predictive Control(MPC) 알고리즘이 적용된 예견 운전자 모델이다.⁷⁾ 운전자 모델은 운전자의 조향특성이 반영되어 정의된 곡선로(reference path)를 추종할 수 있도록 설계되었기 때문에 25초 이후 2초간 인가된 고장신호로 인해 발생한 경로추종 오차를 줄이기 위한 조향입력이 인가되어 경로를 크게 벗어나지 않고 추종할 수 있었다. 아래 Table 2는 성능평가를 위해 적용된 크레인의 물성치를 나타낸다.

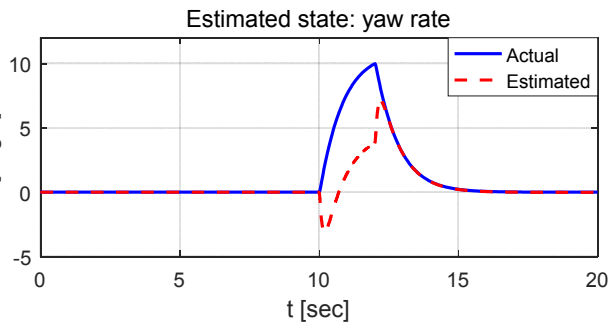
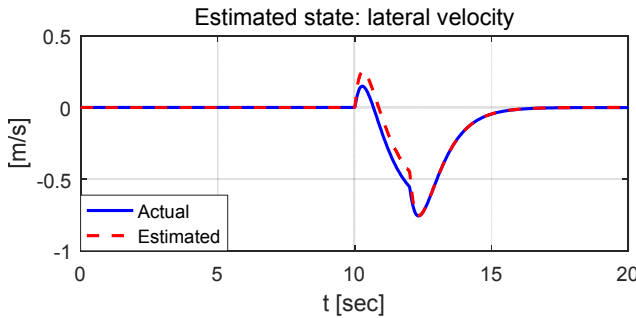
Scenario - 1: forward driving without steering input



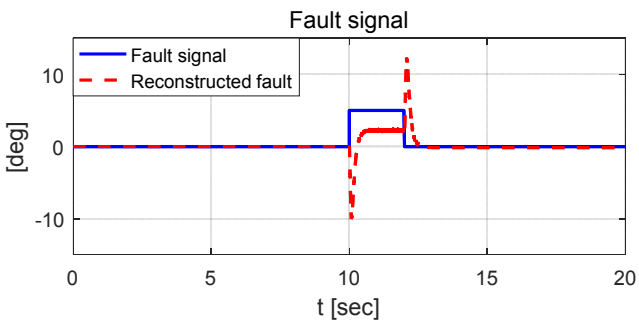
(a) Resultant steering angle: input + fault



(b) Output estimation error: sliding surface



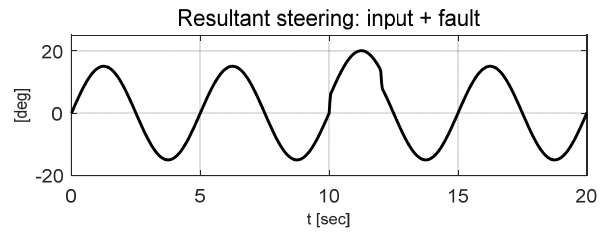
(c) Estimated states: lateral velocity and yaw rate



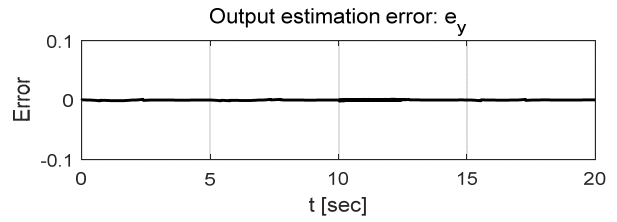
(d) Fault signal and reconstructed fault

Fig. 5 Evaluation results of scenario - 1

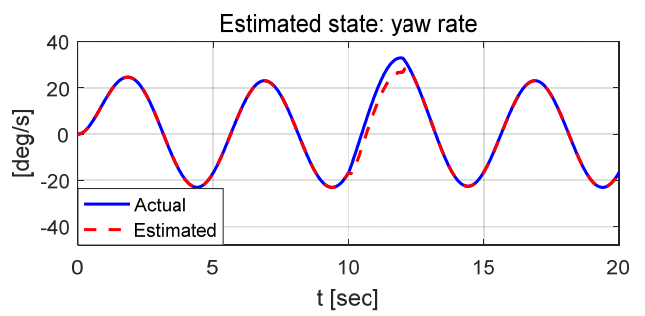
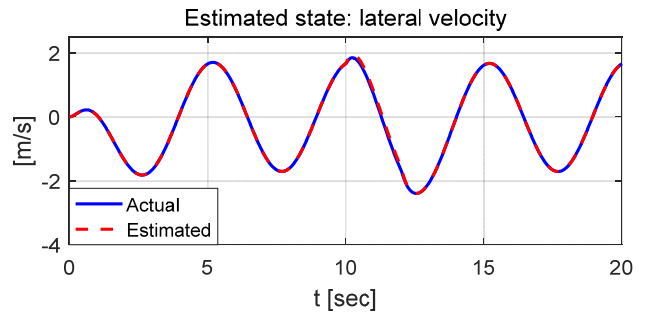
Scenario - 2: driving with steering input(sinewave)



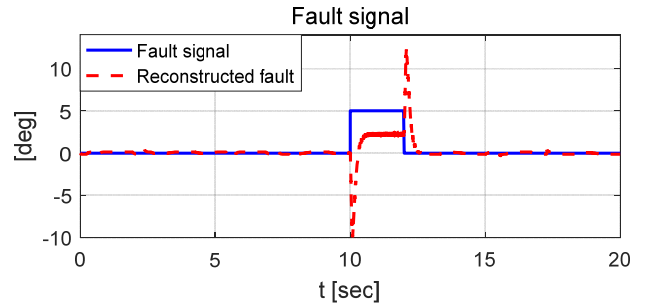
(a) Resultant steering angle: input + fault



(b) Output estimation error: sliding surface



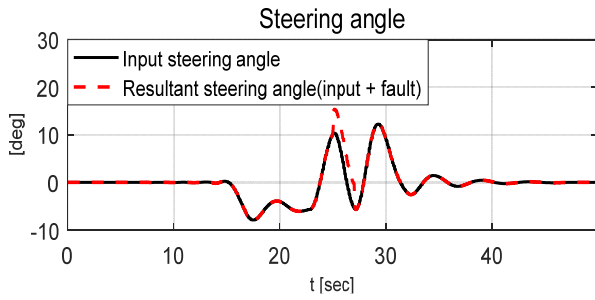
(c) Estimated states: lateral velocity and yaw rate



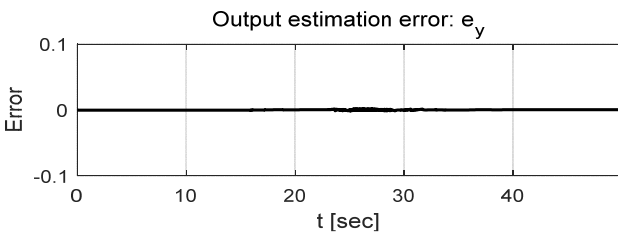
(d) Fault signal and reconstructed fault

Fig. 6 Evaluation results of scenario - 2

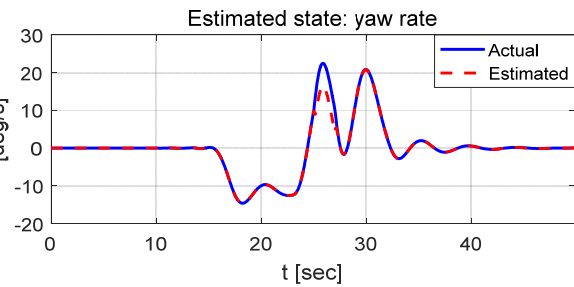
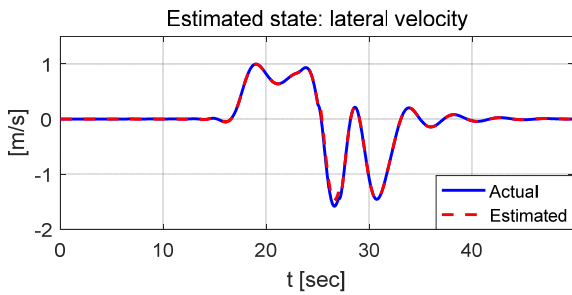
Scenario - 3: curved path driving with driver model



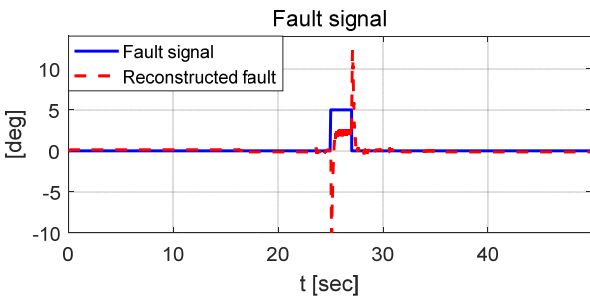
(a) Resultant steering angle: input + fault



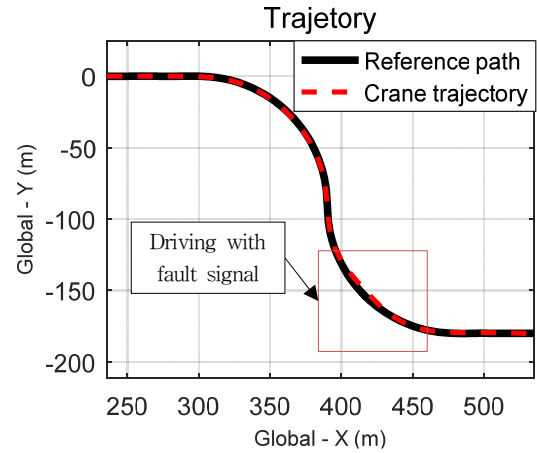
(b) Output estimation error: sliding surface



(c) Estimated states: lateral velocity and yaw rate



(d) Fault signal and reconstructed fault



(e) Crane trajectory

Fig. 7 Evaluation results of scenario - 3

Table 2 Parameters for 60-ton class crane

Division	Unit	Value
Mass	kg	59,236
Rotational inertia	kgm ²	1,110,000
Cornering stiffness	N/rad	300,000
l_1	m	3.968
l_2	m	1.408
l_3	m	0.242
l_4	m	2.052
l_5	m	3.752

Fig. 5, Fig. 6, Fig. 7에서 볼 수 있듯이 상대적으로 고속으로 주행하는 크레인에 고장신호가 인가되었을 때 운전자에 의해 인가되는 조향입력과 크레인의 상태량(lateral velocity, yaw rate)를 이용하여 고장신호를 검출할 수 있었다. 각 Figure 내 인가된 고장신호와 재건된 고장신호를 보면 모든 시나리오에서 고장신호에 대해 강건한 재건성능을 확인할 수 있었다. 또한 Fig. 5(b), Fig. 6(b), Fig. 7(b)에서 볼 수 있듯이 정의된 슬라이딩 서피스 $S = \{e_y : e_y = 0\}$ 에 대한 슬라이딩 모드 관측기의 수렴성능이 정의된 injection term에 의해 유지되고 injection term을 이용하여 고장신호를 검출하는 것을 확인할 수 있었다. 하지만 인가된 사각파 고장신호는 완벽히 재건되지 못하는 것 급격히 변하는 고장신호에 대해 재건되는 신호의 초기 신호가 상대적으로 큰 차이를 보이는 것을 확인할 수 있었다. 하지만 다양한 주행 상황에서 고장신호를 검출하기 위한 신호재건이 가능하다는 것과 합리적인 고장검출용 신호재건이 가능함을 확인하였다.

다음 장에서는 본 논문의 향후 계획과 함께 결론을 기술한다.

5. 결 론

본 논문은 슬라이딩 모드 관측기 기반 다축 전지형 크레인의 조향시스템 고장검출에 관한 연구이다. 고장검출을 위해 슬라이딩 모드 관측기가 사용되었으며 사용된 모델은 bicycle model 기반 수학적으로 도출된 크레인 모델이다. 수학적 모델 도출을 위해 실제 60톤급 크레인의 물성치가 적용되었다. 슬라이딩 모드 관측기의 설계를 통해 크레인 모델의 상태량을 추정함과 동시에 output injection의 정보를 이용하여 조향입력에 대한 고장신호를 검출할 수 있는 고장신호를 재건할 수 있었다. 성능평가는 조향입력이 없는 직진주행, 정현파 입력이 있는 주행, 운전자 모델을 이용한 곡선로 주행의 세 가지 시나리오에 대해 고속주행인 65 kph에 대해 수행되었다. 고장신호는 사각파형의 5 deg 조향입력이 인가되었으며 성능평가 결과 제안된 알고리즘은 본 연구에서 적용된 주행조건 및 고장신호에 대해 합리적인 고장검출 신호를 만들어낼 수 있었다. 하지만 관성이 큰 크레인의 동특성으로 인해 슬라이딩 모드 관측기의 injection term이 인가된 고장신호를 정확히 재건하지 못하였다. 또한 초기 급변하는 고장신호가 인가되는 구간에서는 정의된 sliding surface의 수렴성능을 유지하기 위해 상태변수 추정오차가 상대적으로 커졌고, 크레인의 수학적 모델이 갖는 조향과 상태변수와의 관계에 의해 재건신호가 순간적으로 실제 값과 반대로 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 그리고 본 연구는 입력과 출력값의 신뢰성이 보장된다는 가정 하에 수행된 연구이기 때문에 향후 계측 입력과 출력의 신뢰성을 확률적으로 분석한 결과를 바탕으로 고장신호를 합리적으로 검출할 수 있도록 알고리즘을 고도화할 계획이다. 또한 현실적으로 발생 가능한 잡음과 함께 다양한 형태의 고장신호가 인가되었을 때 합리적인 고장여부의 판단과 함께 이에 대응하는 고장 허용제어 알고리즘 개발을 계획하고 있다. 현재는 내부의 다양한 센서들이 상호보완적으로 고장진단을 수행하

고 있지만 안전성 극대화를 위해 개별 센서의 고장을 독립적으로 판단하면서 고장을 검출할 수 있는 알고리즘이 필요할 것이다. 그러므로 향후 제안된 알고리즘의 고도화 및 검증을 통해 크레인 및 다양한 시스템의 고장안전 알고리즘으로 확대적용이 가능할 것으로 기대한다.

References

- 1) H. Li, Y. Gao, P. Shi, and H. Lam, "Observer-based fault detection for nonlinear systems with sensor fault and limited communication capacity", *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 61, No. 9, pp. 2745-2751, 2016.
- 2) X. Zhu, Y. Xia, S. Chai, and P. Shi, "A finite-frequency domain approach to fault detection filter design for vehicle active suspension systems", In *Intelligent Control and Automation(WCICA) IEEE, 11th World Congress on*, pp. 485-490, 2014.
- 3) S. Yin, G. Wang, and H. Karimi, "Data-driven design of robust fault detection system for wind turbines", *Mechatronics*, Vol. 24, No. 4, pp. 298-306, 2014.
- 4) S. Shao, P. Wheeler, J. Clare, and A. Watson, "Fault detection for modular multilevel converters based on sliding mode observer", *IEEE transactions on power electronics*, Vol. 28, No. 11, pp. 4867-4872, 2013.
- 5) K. Oh, J. Seo, J. Kim, and K. Yi, "MPC-based approach to optimized steering for minimum turning radius and efficient steering of multi-axle crane", *International Journal of Control, Automation, and Systems*, 2017.(Accepted)
- 6) Y. Shtessel et al., "Sliding Mode Control and Observation, Control Engineering", Springer, 2014.
- 7) K. Oh and K. Yi, "A predictive driver model with physical constraints for closed loop simulation of vehicle driver system", 2014 *IEEE 17th International Conference on Intelligent Transportation Systems(ITSC)*, pp. 3126-3131.