

관측기법을 이용한 갠트리 크레인의 고장 진단

김환성* · 김명규** · 유삼상***

Fault Detection of Gantry Crane System By using Observation Technique

H-S Kim* · M-K Kim** · S-S You***

Key words : Gantry crane(갠트리 크레인), Reliable control(신뢰성 제어), Fault detection(고장진단), Multiple observer(다중 관측기)

Abstract

This paper presents a fault detection and isolation algorithm for highly reliable gantry crane system. The algorithm is constructed by multiple PI observer technique, and the magnitude of actuator fault can be estimated by using integrated estimated output error. Also, the complex actuator and/or sensor fault can be detected and isolated by monitoring the integrated error and the estimated state error. Considering the actuator and/or the sensor fault, we verify that these fault can be detected and isolated through simulation. Lastly, we show a simple reliable control method by using the detected fault signal and an added observer.

서 론

컨테이너 터미널의 주요 기능은 갠트리 크레인 및 각종 야드 장비를 운용하여 증가하는 컨테이너 물동량을 신속하게 처리하는 것이며, 이를 위해 크레인의 권상·권하의 위치 및 속도제어^{[1][2]}와 화물의 Anti-sway 제어^[3]가 중요시 되어왔다. 또한, 최근에는 크레인의 고성능화 및 무인화를 추구하면서 비선형 제어이론^[4] 및 강인한 제어이론^[5]의 접목을 행하고 있다.

그러나, 현재까지의 연구결과는 갠트리 크레인을 비롯한 야드장비의 단순한 하드웨어 특성만을 고려한 제어법에 불과하다고 할 수 있다. 즉, 갠트리 시스템의 주행 및 횡횡에 대한 제어법은 무인화에 근거하여 설계하였으며, 감시·감독 및 판단 과정은 유인화에 의존하는 이중적 특성을 지니고 있다. 따라서 시스템 전체의 무인화를 위해서는 관련 정보를 이용한 제어기 설계가 필요하며, 이는 정보의 전달 과정을 포함시키고 있어야 한다.

이를 위해 갠트리 크레인 시스템의 제어계는 관

* 한국해양대학교 물류시스템공학과(원고접수일 : 2001년 3월)

** 한국해양대학교 물류시스템공학과 대학원

*** 한국해양대학교 기계·정보공학부

런 정보를 바탕으로 판단 및 제어할 수 있는 높은 신뢰성을 지녀야 한다. 즉, 장비의 고장이 발생하기 이전에 고장부분을 예지하여 고장에 대처하는 고장 예지 시스템과, 고장이 발생한 경우라도 고장 개소를 명백히 알리고 스스로 대처하는 신뢰성을 지닌 제어기 개발^{[6]~[7]}이 요구된다. 이러한 신뢰성은 고성능 제어법과 함께 컨테이너 처리 물동량을 결정짓는 중요한 요소가 되고 있다. 또한, 나아가서는 컨테이너 터미널의 신뢰성을 향상시켜 대내외적으로 선사 유치 경쟁력을 강화시킬 수 있다.

본 연구에서는 항만 갠트리 크레인을 대상으로, 구동부 및 센서부에 고장이 발생할 때 고장 정도를 정확히 진단하고 고장 개소를 분리하는 알고리즘과 함께, 필요시에는 고장 이외의 부분을 이용, 운영을 계속할 수 있는 갠트리 크레인의 신뢰성을 향상시키는 제어기 개발을 목적으로 한다.

먼저, 갠트리 크레인의 구동부 및 센서부의 고장 요소를 정의하고 이를 크레인 모델 내에 부가시킨다. 고장진단 알고리즘은 PI 관측기법을 이용하여 보이며^[8], 구동부와 센서부의 복합고장의 경우에도 고장진단법의 유효성을 나타낸다. 크레인 모델에 대한 수치 시뮬레이션을 통하여 고장 진단을 위한 Threshold값의 설정법과 함께 다양한 고장에 대해서 정확히 진단 및 분리 될 수 있음을 보인다.

2. 갠트리 크레인 모델 및 고장요소

Fig. 1과 같이 간이화한 갠트리 크레인 시스템의 모델을 고려하자. 먼저, 트롤리의 위치, 속도를 γ 및 $\dot{\gamma}$ 로 나타내며 로프의 흔들림각 및 각속도를 θ 와 $\dot{\theta}$ 로 각각 정의하자. 갠트리 크레인 시스템의 운동방정식을 유도하기 위해, 실제 시스템으로부터 다음과 같은 가정을 고려하기로 한다.

- (A1) 컨테이너의 질량은 스프레더 질량 m_s 와 화물의 질량 m_L 의 합으로 나타내며, 이송 중의 화물의 질량은 일정하다.
- (A2) 로프길이 l 은 일정하며, 로프의 질량과 진동마찰은 무시한다.
- (A3) 트롤리의 질량 M 에는 구동 휠의 질량과 구동모터의 관성이 포함된다.

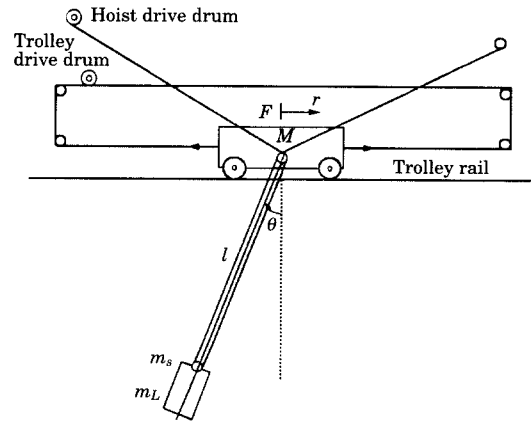


Fig. 1 Coordinate of gantry crane system

- (A4) 트롤리의 주행시 횡행마찰계수 D 에는 구동모터의 역기전력 정수도 포함한다.

위의 갠트리 크레인에 대해 Lagrange 운동방정식을 이용하여 다음의 모델을 얻을 수 있다^[9].

$$(M+m_s+m_L)\ddot{r}+D\dot{r}+(m_s+m_L)l\dot{\theta}^2\sin\theta = (m_s+m_L)l\ddot{\theta}\cos\theta+F \tag{1a}$$

$$(m_s+m_L)l^2\ddot{\theta}+(m_s+m_L)gl\sin\theta = (m_s+m_L)l\ddot{r}\cos\theta \tag{1b}$$

위의 식을 $\theta=0$ 주위에서 선형 근사화하면 다음과 같다.

$$M\ddot{r}+D\dot{r} = -(m_s+m_L)(\ddot{r}-l\ddot{\theta})+F = -m_s g\theta + F + d \tag{2a}$$

$$\ddot{\theta} + \frac{g}{l}\theta = \frac{\ddot{r}}{l} \tag{2b}$$

단 $d(t) = -m_L g \theta(t)$

윗 식으로부터 다음과 같은 상태방정식으로 표현할 수 있다.

$$\dot{x} = Ax + Bu + Bd \tag{3a}$$

$$y = Cx \tag{3b}$$

단,

$$x = \begin{bmatrix} r \\ \theta \\ \dot{r} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix}, C = I_4, u = F,$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -\frac{m_s g}{M} & -\frac{D}{M} & 0 \\ 0 & -(\frac{m_s g}{lM} + \frac{g}{l}) & -\frac{D}{lM} & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{M} \\ -\frac{1}{lM} \end{bmatrix}$$

여기서 I_4 는 4차 단위행렬을 나타낸다.

윗 식에서 $d(t)$ 항은 화물의 변동을 나타내고 있으므로, (A1)의 가정 하에 시스템 행렬 A 에 포함시킬 수도 있다.

3. 고장진단 알고리즘

본 절에서는 고장진단에 대한 이전의 연구결과⁷⁾를 이용하도록 한다. 먼저, 고장요소로서는 크게 구동기의 고장과 센서의 고장으로 간주하며, 이들은 입력부 및 출력부에 각각 인가되는 요소로 고려하면 다음과 같이 표현된다.

$$\dot{x} = Ax + Bu + Ba \tag{4a}$$

$$y = Cx + Gs \tag{4b}$$

여기서, $a(t)$ 와 $s(t)$ 는 각각 구동기 고장벡터와 센서의 고장벡터를 나타낸다.

구체적인 갠트리 크레인의 고장 요소는 다음과 같이 가정한다.

- 구동기의 고장
- 트롤리 위치 센서의 고장
- 트롤리 속도 센서의 고장
- 흔들림 각도 센서의 고장
- 흔들림 각속도 센서의 고장

3.1 구동기만의 고장진단

먼저, 갠트리 크레인의 구동기만의 고장진단을 위해 식 (4)에서 $s(t)=0$ 인 경우에 대해 다음과 같은 PI 관측기¹⁰⁾를 고려하자.

$$\hat{\dot{x}} = (A - K_p C)\hat{x} + K_p y + Bu + B\omega \tag{5a}$$

$$\omega = K_I(y - C\hat{x}) \tag{5b}$$

여기서 \hat{x} 는 추정한 상태벡터를 나타내며, ω 는 관측 출력오차의 변환벡터를 나타낸다. K_p, K_I 는 각각 PI 관측기의 비례계인 및 적분계인을 나타낸다.

다음과 같이 변수를 정의하자.

$$e = x - \hat{x} \tag{6}$$

$$\zeta = a - \omega \tag{7}$$

구동기 고장 $a(t)$ 는 저주파 영역에서 거의 변하지 않는다고 가정하면 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\zeta = -\omega = -K_I C e \tag{8}$$

따라서, 식 (6)과 (8)를 이용하여 확대계를 구성하면 다음과 같이 된다.

$$\begin{bmatrix} \dot{e} \\ \dot{\zeta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A - K_p C & B \\ -K_I C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e \\ \zeta \end{bmatrix} \tag{9}$$

식 (9)가 안정하도록 PI 관측기가 설계된다면, $e(t) \rightarrow 0$ 과 $\zeta(t) \rightarrow 0 (t \rightarrow \infty)$ 가 되므로, 위에서 시스템의 구동기 고장 $a(t)$ 는 식 (7)로부터 다음과 같이 추정할 수 있다.

$$\hat{a}(t) = \omega(t), (t \rightarrow \infty) \tag{10}$$

크레인 시스템에서 구동기 고장과 화물의 변동 $d(t)$ 는 같은 항에 포함되므로, 구동기의 고장이 없는 경우에는 화물의 변동 $d(t)$ 도 추정할 수 있다. 또한, 위의 원리를 이용하면 화물 질량 측정을 위한 로드셀의 고장 및 풍력에 의한 영향도 측정할 수 있다. 그러나, 구동기 고장, 로드셀 고장, 풍력의 영향에 대한 진단은 가능하나 정확한 분리에 대해서는 차후 검토해야 한다.

3.2 구동기 및 센서의 복합고장

갠트리 크레인 모델 (4)식과 같이 구동기 및 센서의 복합고장에 대해서는 다음과 같이 지정된 출력정보를 이용한 다중 PI 관측기를 설계함으로써 고장진단을 행할 수 있다.

$$\hat{\dot{x}}_i = (A - K_{p_i} C^i)\hat{x}_i + K_{p_i} y^i + Bu + B\omega_i \tag{11a}$$

$$\omega_i = K_{I_i}(y^i - C^i \hat{x}_i) \tag{11b}$$

여기서 K_{p_i} 와 K_{I_i} 는 i 번째 PI 관측기 계인을 나타내며, C^i 는 C 행렬의 i 번째 행을 제외시킨 행렬을 나타낸다. 단,

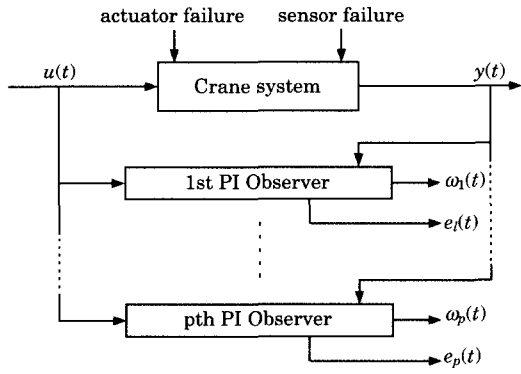


Fig. 2 Fault Diagnosis System Based on Multiple PI Observer

$$y^i = \begin{bmatrix} y_{i1} \\ \vdots \\ y_{ii-1} \\ y_{ii+1} \\ \vdots \\ y_{ip} \end{bmatrix}, e_i = \begin{bmatrix} e_{i1} \\ \vdots \\ e_{ii-1} \\ e_{ii+1} \\ \vdots \\ e_{ip} \end{bmatrix}, \omega_i = \begin{bmatrix} \omega_{i1} \\ \vdots \\ \omega_{im} \end{bmatrix}$$

다중 PI 관측기를 이용한 고장 진단계의 구성은 Fig. 2과 같다. 이를 이용한 센서 및 구동기의 고장 진단법을 요약하면 다음과 같다.

3.2.1 센서의 고장진단 알고리즘

센서의 고장진단을 위한 잔사치(residual)는 다음 식과 같이 주어지며, 잔사치가 1이면 센서고장을 의미한다.

$$\gamma_{si} = \prod_{k=1 (k \neq i)}^{k=p} s_{ki} \tag{12}$$

단,

$$s_{ki} = \begin{cases} 1, & \text{if } |e_{ki}| \geq Th_{si} \\ 0, & \text{else} \end{cases}$$

여기서 Th_{si} 는 i 번째 센서 고장을 검지하기 위한 Threshold값이다.

3.2.2 구동기의 고장진단 알고리즘

구동기의 고장에 대한 진단법도 잔사치를 이용하여 진단을 행하며 다음과 같이 주어진다.

$$\gamma_{ai} = \prod_{k=1}^{k=p} a_{ki} \tag{13}$$

단,

$$a_{ki} = \begin{cases} 1, & \text{if } |\omega_{ki}| \geq Th_{ai} \\ 0, & \text{else} \end{cases}$$

여기서 Th_{ai} 는 i 번째 구동기 고장을 검지하기 위한 Threshold값이다.

4. 갠트리 크레인의 고장진단

본 절에서는 갠트리 크레인에 발생할 수 있는 고장요소에 대해서 Threshold값 설정법을 고찰하며, 시뮬레이션을 통하여 본 알고리즘의 유효성을 검증하도록 한다. 먼저, 시뮬레이션에 이용되는 갠트리 크레인의 파라미터는 Table 1과 같다.

4.1 Threshold값 설정법

Threshold값을 결정하는 것은 시스템의 고장진단을 행함에 있어서 중요하며, 이 Threshold값의 결정에 따라 고장 진단의 오진이 발생할 수 있다.

Threshold값은 주로 크레인의 정상적인 운행시 나타나는 신호의 크기를 분석하고, 신호의 최대치보다 큰 값으로 결정한다. 그러나, Threshold값이 지나치게 크게 결정되면 고장 발생시에 고장진단

Table 1 Parameters for gantry crane system

Symbols		Values
r	Trolley position	[m]
θ	Sway angle	[rad/s]
l	Lope length	20[m]
M	Trolley weight	5,000[kg]
D	Damping coefficient	60
M_s	Spreader mass	4,900[kg]
M_L	Container mass	33,500[kg]
g	Gravity acceleration	9.8[m/s ²]

Table 2 Fault magnitudes and Its Thresholds

Items	Fault Magnitudes	Thresholds
Actuator	200[N]	0.0735
Trolley position sensor	-0.05[m]	0.1
Trolley velocity sensor	-0.01[m/s]	0.01
Sway angle sensor	-0.1[rad]	0.2
Sway ang. vel. sensor	-0.0022[rad/s]	0.011

을 행하지 못하므로 예상하는 고장범위 내에서 감도가 충분하도록 설정해야 한다.

Table 2는 갠트리 크레인에 대한 진단을 위한 고장의 크기와 이에 대한 Threshold값을 나타내고 있다.

4.2 시뮬레이션 및 고찰

본 절에서는 크레인의 구동기 고장, 센서 고장 및 센서의 복합고장에 대한 6가지의 시뮬레이션을 행하며, 샘플링 주기를 5ms로 하였다.

시뮬레이션에 사용된 고장의 크기 및 Threshold값은 Table 2와 같이 하였으며, 시스템의 초기상태는 다음과 같이 고려하였다.

$$x(0)=[0 \ 0.5 \ 0 \ 0]^T$$

고장에 대한 시뮬레이션 결과는 구동기 및 센서의 residual로 나타내었으며 residual의 크기가 1인 경우는 고장을 나타낸다. 각 고장은 5초에서 발생되도록 시뮬레이션을 행하였으며, 센서의 복합고장의 경우는 5초와 8초에 발생되도록 하였다.

4.2.1 구동기의 고장

구동기 고장에 대한 시뮬레이션 결과는 Fig. 3(a)~3(e)와 같다. Fig. 3(a)는 5초에 발생한 구동기 고장에 대해서 1.8초 시간지연을 가지고 진단을 행하고 있다. 이는 갠트리 크레인의 관성모멘트

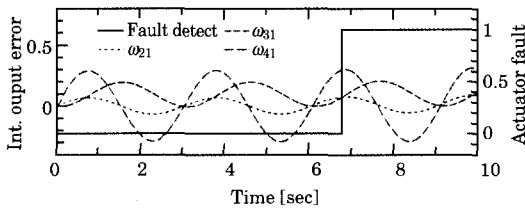


Fig. 3(a) Actuator residual in actuator fault

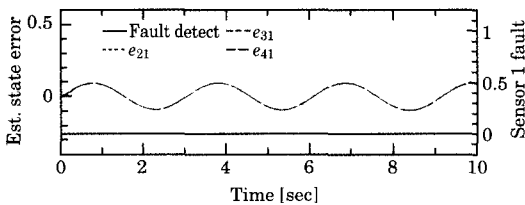


Fig. 3(b) Sensor 1 residual in actuator fault

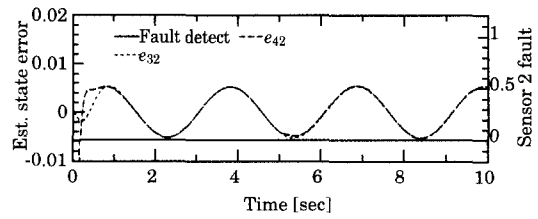


Fig. 3(c) Sensor 2 residual in actuator fault

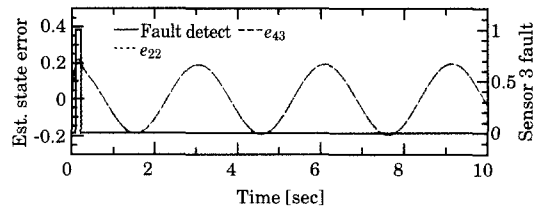


Fig. 3(d) Sensor 3 residual in actuator fault

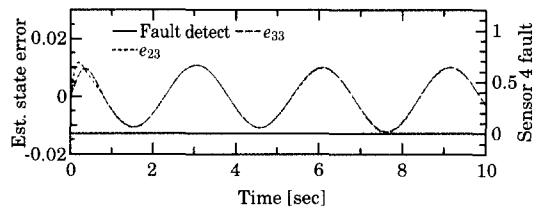


Fig. 3(e) Sensor 4 residual in actuator fault

가 크므로 이에 대한 영향으로 사료된다. 또한, Threshold값을 작게 설정하면 지연시간이 감소되나, 다른 고장에 대해서도 영향이 나타날 수 있어 정확한 분리에 어려움이 있다.

4.2.2 위치 센서의 고장

위치 센서의 고장에 대한 시뮬레이션 결과는 Fig. 4(a)~4(e)와 같다. 센서의 고장은 Fig. 4(b)와 같이 추정 상태 오차에 의해 정확히 진단되며, 다른 요소에도 비교적 적게 영향을 미친다.

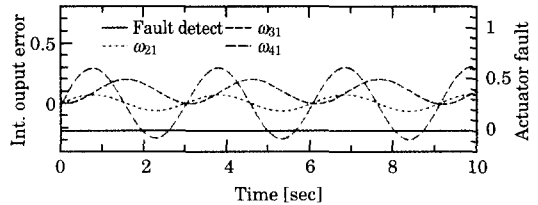


Fig. 4(a) Actuator residual in sensor 1 fault

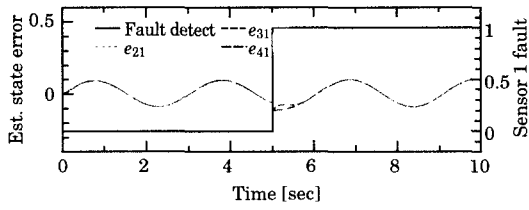


Fig. 4(b) Sensor 1 residual in sensor 1 fault

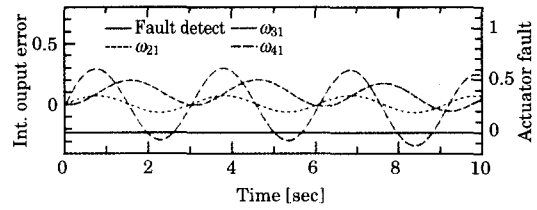


Fig. 5(a) Actuator residual in sensor 2 fault

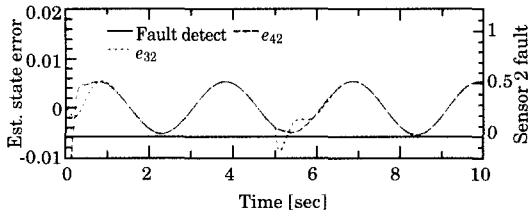


Fig. 4(c) Sensor 2 residual in sensor 1 fault

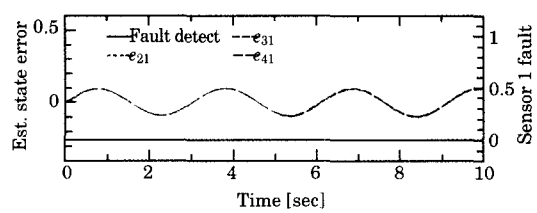


Fig. 5(b) Sensor 1 residual in sensor 2 fault

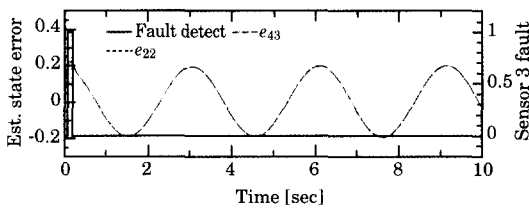


Fig. 4(d) Sensor 3 residual in sensor 1 fault

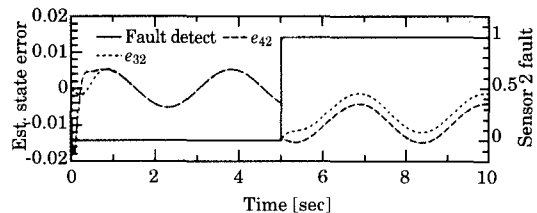


Fig. 5(c) Sensor 2 residual in sensor 2 fault

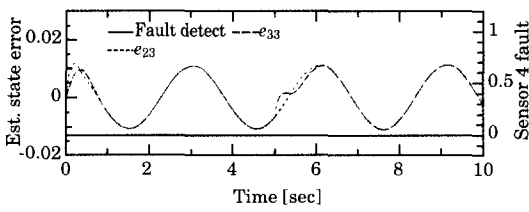


Fig. 4(e) Sensor 4 residual in sensor 1 fault

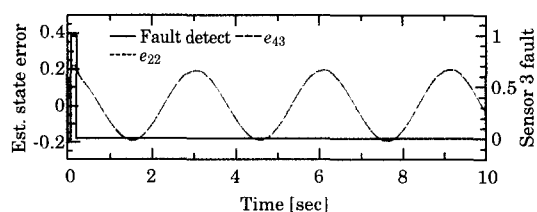


Fig. 5(d) Sensor 3 residual in sensor 2 fault

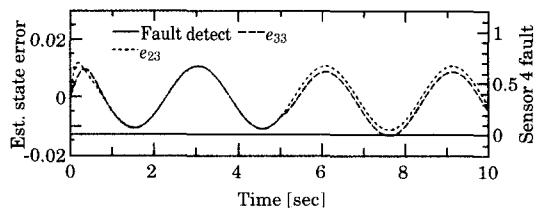


Fig. 5(e) Sensor 4 residual in sensor 2 fault

4.2.3 속도 센서의 고장

속도 센서의 고장에 대한 시뮬레이션 결과는 Fig. 5(a)~5(e)와 같다.

속도센서 고장은 Fig. 5(c)과 같이 e_{32} 와 e_{42} 의 크기에 의해서 진단되고 있다. Fig. 5(c)와 Fig. 5(e)에서와 같이 속도센서 고장으로 인하여 추정오차에 지속적인 정상편차가 발생됨을 알 수 있다.

4.2.4 흔들림 각도 센서의 고장

각도 센서의 고장진단 결과는 Fig. 6(a)~6(e)와

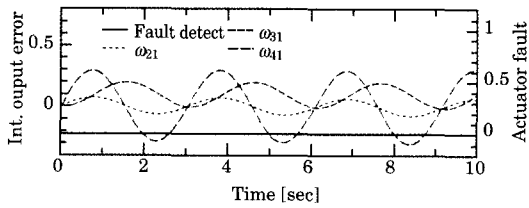


Fig. 6(a) Actuator residual in sensor 3 fault

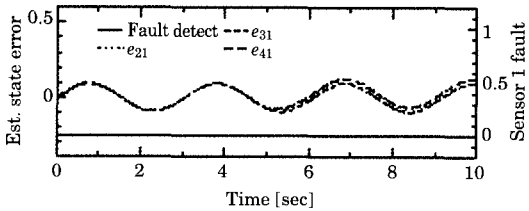


Fig. 6(b) Sensor 1 residual in sensor 3 fault

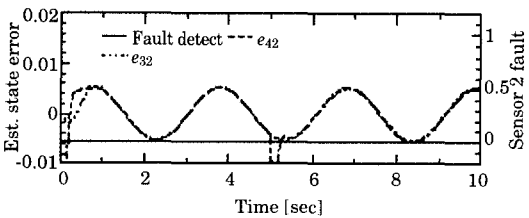


Fig. 6(c) Sensor 2 residual in sensor 3 fault

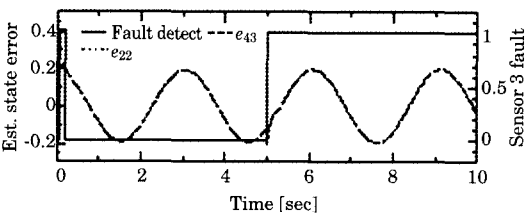


Fig. 6(d) Sensor 3 residual in sensor 3 fault

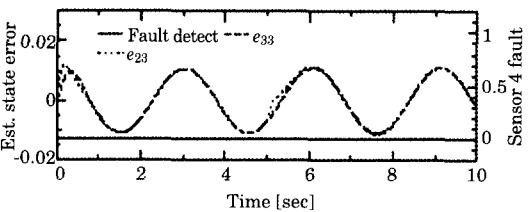


Fig. 6(e) Sensor 4 residual in sensor 3 fault

같다. Fig. 6(d)와 같이 센서의 고장을 진단하였으며, 다른 센서와 같이 지연시간이 거의 없었으나, Fig. 6(b)와 같이 추정오차의 정상편차가 발생하였다.

4.2.5 흔들림 각속도 센서의 고장

각속도 센서의 고장진단 결과는 Fig. 7(a)~7(e)이며, Fig. 7(e)와 같이 고장진단을 행하였다.

그러나, 구동기 고장의 경우와 같이 2.5초 정도의 지연시간이 발생하였으며, 이는 화물의 관성모

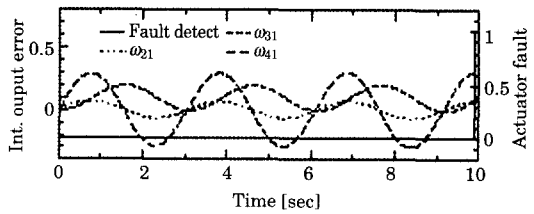


Fig. 7(a) Actuator residual in sensor 4 fault

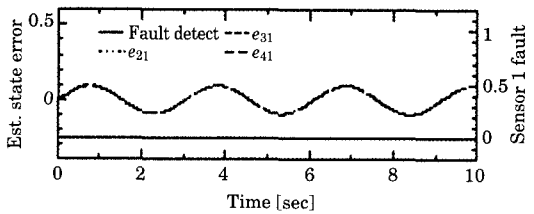


Fig. 7(b) Sensor 1 residual in sensor 4 fault

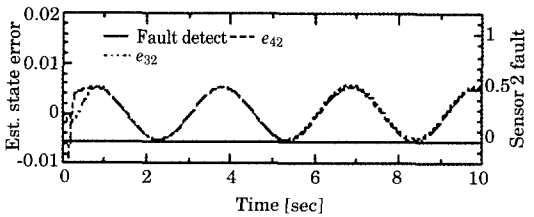


Fig. 7(c) Sensor 2 residual in sensor 4 fault

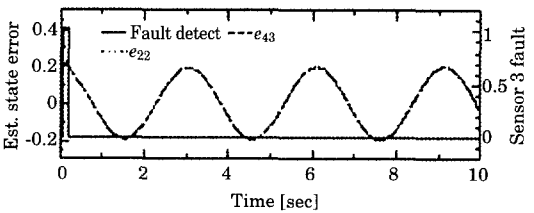


Fig. 7(d) Sensor 3 residual in sensor 4 fault

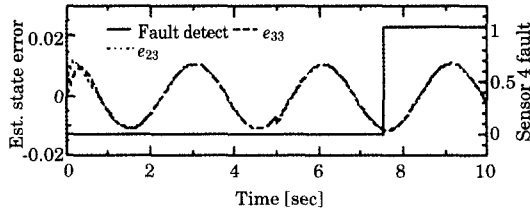


Fig. 7(e) Sensor 4 residual in sensor 4 fault

먼트가 큰 원인이라고 사료된다. 또한, 각속도의 고장은 구동기의 고장에 영향을 미치며, 이로 인하여 9.8초 부근에서 구동기의 고장 오진이 발생하였다. 이는 추후 구동기와 각속도 센서의 고장분리에 대한 알고리즘이 요구된다.

4.2.6 센서의 복합 고장

센서의 복합고장에서는 위치센서와 각도센서의 고장을 각각 5초와 8초에 발생시켰으며, 그 진단 결과는 Fig. 8(a)~8(e)와 같다. Fig. 8(b)와 8(d)에서와 같이 정확한 진단을 보이고 있다.

4.3 신뢰성 향상을 고려한 제어법

본 절에서는 구동기 및 센서의 고장진단을 행한 결과를 이용하여 갠트리 크레인의 신뢰성을 향상시키는 제어법에 대해서 간단히 보이고자 한다.

강인한 서보계 설계법¹⁶⁾에 의한 경우의 제어입력은 다음과 같이 결정된다.

$$u = K_1 x + K_2 \int_0^{\infty} y_e dt \quad (14)$$

여기서 시스템 초기치는 $x(0) = 0_4$ 인 경우를 나타내며, K_1, K_2 는 각각 상태피드백 게인과 서보계 적분게인을 나타낸다. 단, $y_e = y_r - y$ 이며 y_r 은 제어 목표치를 나타낸다.

위의 제어 입력 (14)에서 크레인의 고장을 고려하여 신뢰성 향상시키는 제어입력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$u = -K_1 \hat{x} + \hat{a} + K_2 \int_0^t \hat{y}_e dt \quad (15)$$

여기서 $\hat{x}(t)$ 는 센서가 고장난 출력 요소를 제외하여 추정한 상태 벡터를 나타내며, $y_e(t)$ 는 다음과 같다.

$$\hat{y}_e = y_r - \hat{y} \quad (16)$$

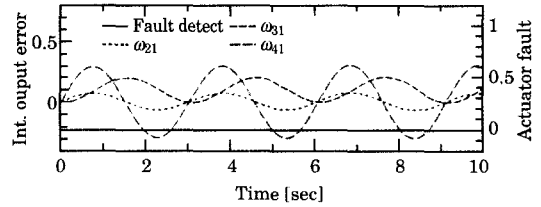


Fig. 8(a) Act. residual in sensor 1 & 3 faults

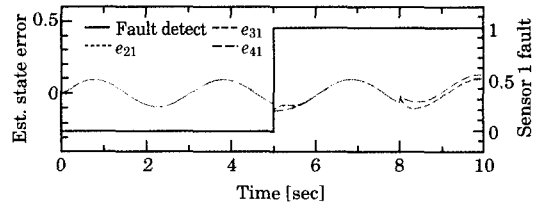


Fig. 8(b) Sen. 1 residual in sensor 1 & 3 faults

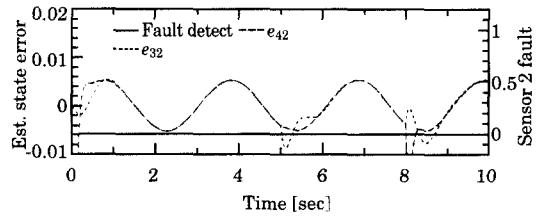


Fig. 8(c) Sen. 2 residual in sensor 1 & 3 faults

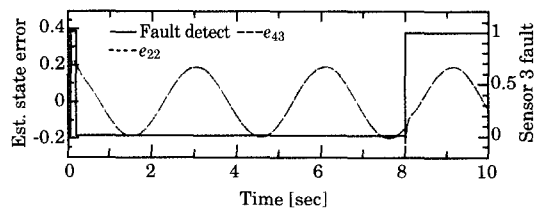


Fig. 8(d) Sen. 3 residual in sensor 1 & 3 faults

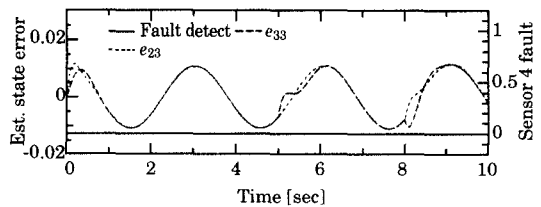


Fig. 8(e) Sen. 4 residual in sensor 1 & 3 faults

단, $\hat{y}(t)$ 는 추정된 출력벡터를 나타낸다.

따라서, 신뢰성을 향상시키기 위해서는 상태벡터 및 출력벡터의 추정이 필요하며, 이를 위해 다중 PI 관측기를 재설계하여 이용할 수 있으나 설계상 어려움이 따르므로 새로운 관측기를 추가 설계하여 이용하는 것이 바람직하다.

6. 결 론

본 논문에서는 갠트리 크레인에 대해 구동기 및 센서의 고장진단을 행하였으며, 시뮬레이션을 통하여 그 유효성을 보였다. 또한, Threshold값 설정법 및 크레인의 고장 진단시의 문제점에 대해서 다루었다. 크레인의 신뢰성을 향상시키는 방법으로 서 구동기 및 센서의 고장의 경우에 대해 간단한 보상법에 대해 제시하였다.

참고문헌

[1] Yasunobu, S. "Automatic Container Crane Operation Based on a Predictive Fuzzy Control", *Trans. on the Society of Instrument and Control Engineers*, Vol. 22, No. 10, pp. 1066~1073, 1986.

[2] Auernig, J. W. and Troger, H. "Time Optimal Control of Overhead Cranes with Hosting of the Load", *Automatica*, Vol. 23, No. 4, pp. 437~447, 1987.

[3] 홍금식, 손성철, 이만형, "컨테이너 크레인의 흔들림 제어(Part I) : 모델링, 제어전략, 기준선도를 통한 오차 피드백 제어", *제어·자동화·시스템공학회*, pp. 23~31, 1997.

[4] Fliss, M. Levine, J. and Rouchon, P. "A simplified Approach of Crane Control via Generalized State Space Model", *Proc. 30th Conference on Decision and Control*, Brighton, England, pp. 736~741, 1991.

[5] Boustany, F. and Novel, B. D. "Adaptive Control of Non-completely Controlled Mechanical Systems Using Dynamic Feedback Linearization and Estimation Design", *Int. J. Adaptive Control and Signal Processing*, Vol. 6, pp. 589~610, 1992.

[6] Veillette, R. J. Medanic, J. V. Perkins, W. R. "Design of Reliable Control Systems", *IEEE*

Trans. on Automatic Control, Vol. 37, No. 3, pp. 290~304, 1992.

[7] 陶山貢市, "Reliable Control", *計測と制御*, Vol. 35, No. 2, pp. 151~159, 1996.

[8] 김환성, 김상봉, 川路茂保, "비례적분 관측기를 이용한 시스템의 고장진단", *한국정밀공학회지*, 제14권, 제2호, pp. 41~47, 1997.

[9] 김상봉, 하주식, "메카니칼 시스템 제어", *한미출판사*, pp. 90~95, pp. 192~205, 1992.

[10] Kim, H. S. "Design of Robust Control System using Proportional Integral Observer", Ph.D. dissertation, Kumamoto Univ. Japan, 1996.

저 자 소 개



김환성(金煥成)

1991년 부경대학교(구, 부산수대) 기관공학과 졸업. 1993년 동대학원 석사(제어공학). 1996년 일본 쿠마모토대학 박사(제어공학). 1998~1998년 8월 부경대학교 해양산업개발연구소 박사후과정. 1998년 9~현재 한국해양대학교 물류시스템공학과 조교수. 관심분야는 물류기기제어, 관측기설계, Descriptor 시스템, 분산제어 등. 당학회 중신회원.



김명규(金溟圭)

1991년 금오공대 전자공학과 졸업. 1999년 부경대학교 대학원 제어계측공학과 석사. 2000년~현재 한국해양대학교 대학원 물류시스템공학과 박사과정 재학 중. 1991년~1995년 (주)대성산소 기술기획부 근무. 1995년~현재 대한상공회의소 직업훈련사업단 근무. 관심분야는 강인 제어, 분산제어 및 이에 대한 응용에 관한 연구 등



유삼상(柳三相)

1983년 부경대학교(구, 부산수대) 기관공학과 졸업. 1990년 미국 Univ. of Wisconsin-Madison 기계공학과 석사. 1994년 미국 Iowa State Univ. 기계공학과 공학박사. 1985년~1988년 현대 자동차엔진 연구부 근무. 1995년~1996년 8월 여수대학교 기관공학과 전임강사. 1996년 9월~현재 한국해양대학교 기계·정보공학부 조교수. 관심분야는 로봇틱스, 강인 제어, 차량 동역학 및 기계메카니즘 등. 당학회 회원