

휴먼에러의 검출 필터 설계

† 김환성 · 김승호*

† 한국해양대학교 물류시스템공학 교수, *한국산업안전공단

Design of Human-Error Detect Filter

† Hwan-Seong Kim · Seung-Ho Kim*

† Dept of Logistics, National Korea Maritime University, Pusan 606-791, Korea

* Korea Occupational Safety and Health Agency, Incheon 403-711, Korea

요 약 : 종래의 휴먼에러를 검출하기 위한 검출기는 관측기 설계를 기초로 하였으며, 주로 계단형 휴먼에러를 가정하여 검출하는데 이론적 한계를 지니고 있다. 본 연구에서는 보다 다양한 형태의 휴먼에러를 검출하기 위한 방법으로 휴먼에러에 포함될 수 있는 형태의 오류를 모델링하여 검출 필터로서 사용할 수 있음을 보이며, 휴먼에러 검출 필터의 존재조건을 고찰한다.

핵심용어 : 휴먼에러, 검출기, 필터

ABSTRACT : In previous research results, human error can be detected by using observation theory which assumed with step human failures, thus the detector has a limit to detect the human failures. In this paper, we propose a human error detect filter for given human failures. Various kind of human failures can be modeled, and from these models, an argumented human failure model can constructed. By using the argumented human failure model, the human error detect filter can be designed.

KEY WORDS : Human error, Detector, Filter

1. 서 론

점차 산업의 고도화 및 대형화로 인하여, 많은 분야에서 자동화가 실현되고 있으나 해저작업 및 원자력 플랜트 등에서는 특수성으로 인하여 완전 자동화를 실현하기 어려우며, 반드시 유인으로 작업을 행하여야 한다. 유인 작업시, 필연적으로 작업자에 대한 오류는 배제할 수 없으며 이에 대한 대책은 필수 불가결한 사항으로 포함되고 있다.

작업자 오류 검출에 대해 다수 연구가 행해져 왔으며[1]-[2], 종래의 연구에서는 작업자 모델을 개발하여[3] 모델에 대하여 미지입력 관측기[4] 등을 이용한 방법으로 작업자의 오류를 진단 및 분석을 행하여 왔으나, 설계조건이 까다롭거나 또는 계단형 작업자 오류만을 가정하여 주기적인 오류 등의 특정한 형태의 작업자 오류를 검출하기에는 한계가 있다. 이로서 다양한 형태의 작업자 오류에 대하여 검출할 수 있는 휴먼에러 검출 필터 설계가 요구되고 있다.

본 연구에서는 주파수 영역에 대한 작업자 오류를 검출할 수 있는 휴먼에러 검출 필터를 제안한다. 이는 다양한 형태의

휴먼에러에 대해 확대계를 구성함으로써 휴먼에러 검출이 가능하며, 다양한 산업분야로 응용 및 확대할 수 있어 향후 휴먼에러 필터로서 적용성이 뛰어나다고 할 수 있다.

2 문제정의

휴먼에러를 포함한 작업자 모델을 다음과 같은 선형 이산시스템으로 가정하자.

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) \quad (1a)$$

$$y(k) = Cx(k) + \delta(k) \quad (1b)$$

여기서 $x(k) \in \mathbb{R}^n$ 는 상태벡터, $u(k) \in \mathbb{R}^m$ 는 입력벡터, $y(k) \in \mathbb{R}^p$ 는 출력벡터, $\delta(k) \in \mathbb{R}^p$ 는 휴먼에러벡터이다.

위 (1)식에서는 휴먼에러가 작업에 직접적으로 영향을 미치는 요소로 가정하였으며, (1)식에 대한 휴먼에러 검출 필터를 다음과 같이 설계할 수 있다.

$$\hat{x}(k+1) = A\hat{x}(k) + Bu(k) + K\zeta(k) + H\epsilon(k) \quad (2a)$$

$$\zeta(k+1) = N\zeta(k) + M\epsilon(k) \quad (2b)$$

$$\epsilon(k) = y(k) - C\hat{x}(k) \quad (2c)$$

† 종신회원, kimhs@hhu.ac.kr, 010-7540-2409

* 일반회원, kksh961@hanmail.net, 010-9042-2010

여기서 $\hat{x}(k) \in \mathbb{R}^n$ 는 상태추정벡터, $\epsilon(k) \in \mathbb{R}^p$ 는 휴먼에러검출벡터 및 K, H, N, M 은 필터 계인을 나타낸다.

본 연구에서는 (2)식의 휴먼에러 검출 필터를 통하여 (1)식에서의 $\delta(k)$ 를 검출하고자 한다.

3. 필터 조건

먼저, (1)식에 휴먼에러가 포함되지 않은 작업자 모델을 가정하자.

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) \quad (3a)$$

$$y(k) = Cx(k) \quad (3b)$$

(3)식에 대하여 (2)식이 휴먼에러 검출 필터가 되기 위해서는 (2c)식이 영이 되어야 하며, 이를 위한 충분조건은 다음과 같다.

$$\lim_{k \rightarrow \infty} e_x(k) = 0 \quad (4a)$$

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \zeta(k) = 0 \quad (4b)$$

여기서 $e_x(k) = x(k) - \hat{x}(k)$ 를 나타낸다.

(2)식 - (4)식으로부터 다음과 같이 정리된다.

$$\begin{aligned} e_x(k+1) &= x(k+1) - \hat{x}(k+1) \\ &= (A-HC)e_x(k) - K\zeta(k) \end{aligned} \quad (5)$$

(2b)식으로부터 확대계를 구성하면, 다음과 같이 되며

$$\begin{bmatrix} e_x(k+1) \\ \zeta(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A-HC & -K \\ MC & N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_x(k) \\ \zeta(k) \end{bmatrix} \quad (6)$$

다음 조건을 만족하도록 필터 계인을 설계한다면, (2)식은 휴먼에러검출필터가 되며 (2c)식을 통하여 휴먼에러를 검출할 수 있다.

$$\lambda_i \begin{bmatrix} A-HC & -K \\ MC & N \end{bmatrix} \leq \text{unit circle}, \quad \forall_i \quad (7)$$

여기서 λ_i 는 고유치를 나타낸다.

4. 휴먼에러 검출 필터 설계

(1)식의 휴먼에러 작업자 모델에서 $\delta(k)$ 는 다음과 같은 차분방정식으로 나타낼 수 있다.

$$P(q^{-1})\delta(k) = 0 \quad (8)$$

여기서 q^{-1} 는 $q^{-1}\delta(k) = \delta(k-1)$ 을 의미하는 shift operator이며 $P(q^{-1})$ 는 q^{-1} 의 다항식으로서 다음과 같이 주어진다.

$$P(q^{-1}) = q^r + a_{r-1}q^{r-1} + \dots + a_1q + a_0 \quad (9)$$

(2c)식과 (1)식으로부터 휴먼에러검출함수를 구해보면 다음과 같이 나타낸다.

$$\epsilon(k) = Ce_x(k) - \delta(k) \quad (10)$$

윗 식에 $P(q^{-1})$ 를 작용시켜 (8)식의 관계를 이용하면

$$\begin{aligned} \epsilon(k+r) &= -a_{r-1}\epsilon(k+r-1) - \dots - a_1\epsilon(k+1) \\ &\quad - a_0\epsilon(k) + CP(q^{-1})e_x(k) \end{aligned} \quad (11)$$

로 되며, 윗 식을 상태방정식으로 표현하면 다음과 같이 된다.

$$\xi(k+1) = N\xi(k) + MCP(q^{-1})e_x(k) \quad (12)$$

단,

$$\xi(k) = [\epsilon(k) \ \epsilon(k+1) \ \dots \ \epsilon(k+r-1)]^T$$

$$N = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & \dots \\ \vdots & 0 & 0 & \ddots & 0 \\ \vdots & 0 & 0 & 0 & \ddots \\ 0 & \dots & \dots & 0 & 1 \\ -a_0 & -a_1 & \dots & \dots & -a_{r-1} \end{bmatrix}, \quad M = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ \vdots \\ 0 \\ I \end{bmatrix}$$

(10)식 휴먼에러검출함수를 이용하여 상태추정오차를 구하면

$$e_x(k+1) = (A-HC)e_x(k) - K\zeta(k) - H\delta(k) \quad (13)$$

로 되며, 윗 식에 $P(q^{-1})$ 를 작용시켜 (8)식의 관계를 이용하면 다음과 같이 된다.

$$P(q^{-1})e_x(k+1) = (A-HC)P(q^{-1})e_x(k) - KP(q^{-1})\zeta(k) \quad (14)$$

변수 $\xi(k)$ 와 $\zeta(k)$ 사이에는 (2b)식과 (12)식에 의해 다음의 관계에 있으므로

$$\xi(k) = P(q^{-1})\zeta(k) \quad (15)$$

위의 관계를 이용하면 (14)식은 다음과 같이 고쳐 쓸 수 있다.

$$P(q^{-1})e_x(k+1) = (A-HC)P(q^{-1})e_x(k) - K\xi(k) \quad (16)$$

(12)식과 (16)식으로 확대계를 구성하면 다음과 같다.

$$x_e(k+1) = \begin{bmatrix} A-HC & -K \\ MC & N \end{bmatrix} x_e(k) \quad (17)$$

단,

$$x_e(k) = \begin{bmatrix} P(q^{-1})e_x(k) \\ \xi(k) \end{bmatrix}$$

따라서 (7)식이 만족되도록 필터 계인 K 와 H 를 설계하면 (17)식이 영으로 수렴하게 되며, (2c)식을 이용하여 휴먼에러 $\delta(k)$ 를 검출 할 수 있다.

5. 휴먼에러 검출 필터 설계조건

본 절에서는 (7)식을 만족하는 필터 계인 K 와 H 의 설계조건에 대해 다루도록 한다. 먼저, 다음의 조건을 만족하는 행렬

P, Q 를 정의하자.

$$K=PQ, Z=QM \quad (18)$$

여기서, $P \in \mathbb{R}^{n \times p}, Q \in \mathbb{R}^{r \times r}$ 이며, $\text{rank } Q = r$.

(18)식을 이용하면 (4)식의 행렬은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} I_n & 0 \\ 0 & Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A-HC & -K \\ MC & N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_n & 0 \\ 0 & Q^{-1} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} A-HC & -P \\ ZC & QNQ^{-1} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} A & P \\ 0 & QNQ^{-1} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} H \\ Z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C & 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (19)$$

위의 관계로부터 다음의 보조정리를 얻을 수 있다.

[보조정리1] : $\left(\begin{bmatrix} C & 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} A & P \\ 0 & QNQ^{-1} \end{bmatrix} \right)$ 이 가관측이면 일반화 관측기 게인 K 와 H 는 존재한다. \square

위의 보조정리1에서 $\left(\begin{bmatrix} C & 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} A & P \\ 0 & QNQ^{-1} \end{bmatrix} \right)$ 의 가관측은 다음의 rank 조건으로

$$\text{rank} \begin{bmatrix} sI-A & P \\ 0 & sI-QNQ^{-1} \\ C & 0 \end{bmatrix} = n+p, \forall s \in \mathbb{C} \quad (20)$$

로 되며, 모든 $s \in \mathbb{C}$ 에 대해

$$\text{rank} [sI-QNQ^{-1}] = p \quad (21)$$

이므로 (20)식이 성립하기 위한 필요충분조건은

$$\text{rank} \begin{bmatrix} sI-A \\ C \end{bmatrix} = n, \forall s \in \mathbb{C} \quad (21)$$

임을 알 수 있다. 여기서 \mathbb{C} 는 복소평면을 나타낸다. 따라서 휴먼에러 검출필터 존재조건은 다음의 정리로 요약할 수 있다.

[정리1] : 작업자 모델 (3)에 대해 휴먼에러 검출필터 (2)식이 존재할 필요충분조건은

$$\text{rank} \begin{bmatrix} sI-A \\ C \end{bmatrix} = n, \forall s \in \mathbb{C}$$

이 성립하는 것이다. \square

6 결론

본 연구에서는 휴먼에러 검출 필터를 제안하였으며, 설계방법 및 존재조건을 다루었다. 종래의 연구의 결과와 비교하여

본 휴먼에러 검출 필터는 다양한 형태의 휴먼에러에 대하여 정의하며, 이에 대한 검출이 가능하다. 또한, 설계조건이 까다롭지 않아, 다양한 분야에 적용 가능할 것으로 보인다.

향후, 본 연구에 대하여 시뮬레이션을 행하며, 종래연구와의 비교검토를 통하여 유효성을 검증하고자 한다. 또한, 실제 산업분야로의 적용을 위한 방법 검토가 필요할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- [1] H. Wang and S. Daley, "Actuator fault diagnosis: an adaptive observer based technique", IEEE Trans. on Automatic Control, 41(7), pp. 1073-1078, 1996
- [2] H.S. Kim, S.B. Kim and S. Kawaji, "Fault detection and isolation of system using multiple PI observers", Journal of the Korean Society of Precision Engineering, 14(2), pp. 41-47, 1997
- [3] Hwan-Seong Kim, Ngoc Hoang Son Tran, Seung-Ho Kim, "Design of Human Works Model for Gantry Crane System", International Journal of Navigation and Port Research, Vol. 29, No. 2, pp. 135-140, 2005
- [4] Hwan-Seong Kim, Seung-Min Kim, "Detection and Isolation Method for Operator Failure by Unknown Input Observer", Journal of Navigation and Port Research, Vol. 32, No. 2, pp. 133-140, 2008