

## 불확실성을 고려한 시스템에서의 복합형 이상검출 및 격리

### Hybrid Fault Detection and Isolation for Uncertainty System

\*유 호 준\*, 김 대 우\*, 권 오 규\*

\*인하대학교 전자전기컴퓨터공학부 (Tel:+82-32-860-7395; Fax:+82-32-863-5822; E-mail:g9611088@inhavision.inha.ac.kr)

**Abstracts** This paper proposes a fault detection and isolation method by combining the parameter estimation method[4] with the observer based method[2] to use merits of both methods. To verify the performance of the method proposed some simulations applied to remotely piloted vehicle are performed.

**Keywords** Fault detection, Fault isolation, Fault diagnosis, Parameter estimation, Unknown input observer

#### 1. 서 론

자동제어 시스템 분야에서는 근래에 들어서 복잡하고 정밀한 플랜트가 발전됨에 따라서 이들 플랜트에서의 이상검출 및 진단은 가장 중요한 분야로 발전되어 왔다. 이상 발생 직후, 이상의 초기 검출은 이상의 파급으로 인한 플랜트의 완전한 고장이나 이로 인한 다른 심각한 피해(심지어는 인간에게 직접적인 피해) 등을 피하는데 중요한 역할을 한다.

이상진단이라 하면 이상의 발생을 관측하는 이상검출과 이상의 위치를 판단하는 이상 격리가 있는데, 최근 동향을 살펴보면 이상의 검출에 관한 연구는 활발히 진행되고 있는 반면에 이상의 위치를 검출하는 이상격리에 관한 연구는 미흡한 실정이다. 그러므로, 이 논문에서는 이러한 이상검출과 격리를 동시에 수행하기 위한 복합형 이상검출 및 격리에 관한 연구를 목적으로 한다.

이상검출 및 진단기법 중에서 대상시스템의 모델을 이용하는 모델기반기법에는, 관측자를 이용한 기법과 계수추정을 이용한 기법의 두 가지가 있다. 이 기법들은 모두 잔차 발생기를 이용하며, 잔차 발생기 구성 형태에 따라 관측자를 이용한 기법은 등가식 접근법, 검출필터 이용법, 미지 입력 관측자 이용법[2] 등으로 구분되고, 계수추정 기법은 계수추정 과정에 사용되는 모델 및 추정 알고리즘의 형태에 따라 여러 형태가 제시되고 있다[4][5]. 이러한 관측자를 이용하는 기법과 계수추정을 이용하는 기법은 전혀 다른 형태로 발전되어 왔으나 최근 들어 각 방법의 장점을 취합한 복합 형태의 기법들이 제시되고 있다[3][6]. 이 논문에서는 이러한 서로 다른 형태의 이상검출 기법을 사용하여 보다 효과적인 이상진단 기법을 제시한다.

#### 2. 시스템 표현

이 논문에서는 시스템의 불확실성을 다음 식과 같이 덧셈형 오차로 나타내기로 한다.

$$\begin{aligned} x(k+1) &= Ax(k) + Bu(k) + Ed(k) + b, \xi_i(k) \\ y(k) &= Cx(k) + I, \eta_j(k) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서,  $x(k) \in \mathbb{R}^n$ 은 상태벡터이고,  $y(k) \in \mathbb{R}^m$ 은 출력벡터,  $u(k) \in \mathbb{R}^r$ 은 기지 입력벡터,  $d(k) \in \mathbb{R}^p$ 는 미지 입력(또는 외란)벡터이고, 또한 행렬  $A, B, C, E$ 는 기지의 행렬이다.  $b, \xi_i(k)$ 항은 이상이  $i$  번째 구동기에서 일어났음을 표현하는 항이고,  $I, \eta_j(k)$ 항은  $j$  번째 센서에서의 이상발생을 표현하는 항이다.

또한 계수추정법을 이용한 이상검출법을 적용시키기 위해서 위에서 고려한 상태공간모델의 전달함수 형태를 살펴보면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} y(k) &= G_f(q^{-1})u(k) + v(k) \\ &= G(q^{-1}, \theta)u(k) + G_\Delta(q^{-1})u(k) + v(k) \end{aligned} \quad (2)$$

$$= B(q^{-1}, \theta, N_B)u_F(k) + \eta(k) + v(k) \quad (3)$$

여기서, 실제 시스템  $G_f$ 와 공칭시스템  $G$ 는 안정하고 인과적인 시스템이라 가정한다. 그리고,

$$G(q^{-1}, \theta) = \frac{B(q^{-1}, \theta, N_B)}{F(q^{-1}, N_F)} \quad (4)$$

$$B(q^{-1}, \theta, N_B) \equiv b_1q^{-1} + b_2q^{-2} + \dots + b_{N_B}q^{-N_B}$$

$$F(q^{-1}, \theta, N_F) \equiv f_1q^{-1} + f_2q^{-2} + \dots + f_{N_F}q^{-N_F}$$

$$\theta \equiv [b_1 \ b_2 \ \dots \ b_{N_B}]^T$$

$$u_F(k) \equiv \frac{1}{F(q^{-1}, N_F)}u(k) \quad (5)$$

$$\eta(k) \equiv G_\Delta(q^{-1})u(k) = \sum_{i=0}^{N_\Delta-1} h(i)u(k-i) \quad (6)$$

위의 방정식을 간략화 된 형태로 다시 쓰면 다음과 같다.

$$Y = \Phi\theta + \Psi H + V \quad (7)$$

여기서,

$$Y = [y(1) \ y(2) \ \dots \ y(M)]^T$$

$$\Phi = \begin{bmatrix} u_F(0) & u_F(-1) & \dots & u_F(1-N_B) \\ u_F(1) & u_F(0) & \dots & u_F(2-N_B) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ u_F(N-1) & u_F(N-2) & \dots & u_F(N-N_B) \end{bmatrix}$$

$$\Psi = \begin{bmatrix} u(1) & 0 & \dots & 0 \\ u(2) & u(1) & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ u(N) & u(N-1) & \dots & u(N-N_h+1) \end{bmatrix}$$

$$H \equiv [h(0) \ h(1) \ \dots \ h(N_h-1)]^T$$

$$V \equiv [v(1) \ v(2) \ \dots \ v(M)]^T$$

이며,  $N$ 은 주어진 데이터의 크기이고  $\{v(i)\}$ 는 분산이  $\sigma^2$ 인 백색잡음이다.

#### 3. 계수 추정법을 이용한 이상 검출

##### 3.1 분산 및 편향 오차 계산

공칭 계수 벡터  $\theta$ 는 다음과 같이 일반적인 선형 최소자승법을 따른다.

$$\hat{\theta} = (\Phi^T \Phi)^{-1} \Phi^T Y \quad (8)$$

여기서 추정 오차는 다음과 같이 잡음  $V$ 와 비모델링  $\Psi H$ 로 이루어진다.

$$\hat{\theta} - \theta = (\Phi^T \Phi)^{-1} \Phi^T (V + \Psi H) = \tilde{\theta}_1 + \tilde{\theta}_2 \quad (9)$$

우선 여기서 첫번째 항인 잡음으로 인한 오차항의 분산오차의 상호분산을 살펴보면 다음과 같다.

$$E[\tilde{\theta}_1 \tilde{\theta}_2^T] = (\Phi^T \Phi)^{-1} \sigma^2 \quad (10)$$

여기서,  $\sigma^2$ 은 측정잡음의 분산이고 알고 있는 값이라 가정한다. 두 번째 항인 편향오차항은 사전정보 또는 경험적 데이터를 이용하여 계산할 수 있는데, 만약 사전정보가 유효하지 않다면  $H$  값은 이용할 수 있는 데이터만으로 추정하는 것이 가능하다. 이 방법과 유사한 개념으로 Goodwin *et al.*[1]에 의해서 소개되어진 정량화 개념이 있는데, 이 방법에서는 최소자승법 대신에 최대공산법(Maximum likelihood method)이 사용되어 지고 있다. 식(5)로부터 전모델에서의  $H$ 의 추정은 다음과 같다.

$$\hat{H} = (\Psi^T \Pi \Psi)^{-1} \Psi^T \Pi Y \quad (11)$$

여기서,

$$\Pi \equiv I - \Phi(\Phi^T \Phi)^{-1} \Phi^T \quad (12)$$

$H$ 의 크기를  $Y$ 의 조건부 확률을 이용하여 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} E[HH^T | Y] &= E[(\hat{H} - H + H)(\hat{H} - H + H)^T | Y] \\ &= \hat{H}\hat{H}^T + E[(\hat{H} - H)(\hat{H} - H)^T | Y] \\ &= \hat{H}\hat{H}^T + (\Psi^T \Pi \Psi)^{-1} \sigma^2 \equiv C_n^a \end{aligned} \quad (13)$$

그러므로, 이로부터 편향오차 상호분산은 다음과 같다.

$$E[\tilde{\theta}_2 \tilde{\theta}_2^T | Y] = (\Phi^T \Phi)^{-1} \Phi^T \Psi C_n^a \Psi^T \Phi (\Phi^T \Phi)^{-1} \quad (14)$$

### 3.2 이상검출법

우선 이상이 없는 데이터와 이상이 있는 데이터를 각각  $J_n = \{Y_n, \Phi_n, \Psi_n\}$ ,  $I_f = \{Y_f, \Phi_f, \Psi_f\}$ 라 하면 이에 해당하는 모델방정식은 다음과 같다.

$$Y_i = \Phi_i \theta_i + \Psi_i H_i + V_i, \quad i = n, f \quad (15)$$

또한 이에 해당하는 최소자승법에 의한 추정계수는 다음과 같다.

$$\hat{\theta}_i = (\Phi_i^T \Phi_i)^{-1} \Phi_i^T Y_i, \quad i = n, f \quad (16)$$

이 계수추정법을 이용한 이상검출법의 기본 개념은 추정된 정상 계수와 추정된 이상 계수간의 차이를 비교하는 것이다. 그러므로 이상검출을 위한 시험변수를 생성하기 위해 이들 추정계수간의 오차의 상호분산을 계산하면,

$$\begin{aligned} C &\equiv E[(\hat{\theta}_n - \hat{\theta}_f)(\hat{\theta}_n - \hat{\theta}_f)^T] \\ &= [(\Phi_n^T \Phi_n)^{-1} + (\Phi_f^T \Phi_f)^{-1}] \sigma^2 + (Q_n - Q_f) C_n^a (Q_n - Q_f)^T \end{aligned} \quad (17)$$

여기서,

$$Q_i \equiv (\Phi_i^T \Phi_i)^{-1} \Phi_i^T \Psi_i, \quad i = n, f \quad (18)$$

이상 검출법은 위의 계수 변화의 상호분산 함수로써 이루어진다. 이에 본 논문에서는 다음과 같은 형태의 시험변수를 사용하였다.

$$T_1 \equiv (\hat{\theta}_n - \hat{\theta}_f)^T C^{-1} (\hat{\theta}_n - \hat{\theta}_f) \quad (19)$$

이러한 시험변수가 사전에 정해진 문턱값 이상이면 계수의 변화가 변화한 것으로 판단하여 시스템에 이상이 생긴 것으로 진단한다.

## 4. 미지 입력 관측자를 이용한 이상 격리

### 4.1 미지입력관측자(UIO: Unknown Input Observer)의 설계

이상격리신호를 발생하기 위해서 우선 UIO의 설계에 대해서 알아보자. 식(1)에서 이상을 표현하는 항인  $b_i \xi_i(k)$ 항과  $I_i \eta_i(k)$ 항을 제외하고 불확실성이 고려된 시스템의 전차수 관측자의 구조는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} z(k+1) &= Fz(k) + Tbu(k) + Ky(k) \\ \hat{x}(k+1) &= z(k) + Hy(k) \end{aligned} \quad (20)$$

여기서,  $\hat{x} \in \mathbb{R}^n$ 은 추정상태벡터이고,  $z \in \mathbb{R}^n$ 은 전차수 관측자의 상태벡터이다. 그리고  $F, T, K, H$ 는 외란분리나 다른 설계조건에 맞게 설계되어야 할 행렬이다. 위의 관측자를 식(1)에 적용하면 관측자 추정오차는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} e(k) &= x(k) - \hat{x}(k) \\ &= Fe(k) \end{aligned} \quad (21)$$

여기서,

$$\begin{aligned} K &= K_1 + K_2, & K_2 &= FH, & T &= I - HC \\ F &= A - HCA - K_1 C, & H &= E[(CE)^T CE]^{-1} (CE)^T \end{aligned}$$

이고,  $F$ 는  $K_1$ 을 조정하여 모든 고유치들이 안정하게 설계되어야 한다. 또한 위에서  $H$ 는 UIO를 만족시키기 위한 식인  $(HC - I)E = 0$ 의 특이해이므로, 이 특이해가 성립하기 위해서는  $rank(CE) = rank(E)$ 라는 조건을 만족해야 한다.

### 4.2 이상검출필터(BFDF: Beard Fault Detection Filter)

초기의 이상검출필터는 외란이 없는 시스템에서 고려한 단순한 전차수 관측자였다. 이를 위하여 식(1)에서 외란항인  $Ed(k)$ 항을 제외한 시스템을 고려하면 이상검출필터는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \hat{x}(k+1) &= A\hat{x}(k) + Bu(k) + K(y(k) - C\hat{x}(k)) \\ r(k) &= y(k) - C\hat{x}(k) \end{aligned} \quad (22)$$

여기서,  $r \in \mathbb{R}^m$ 은 잔차벡터이고  $K \in \mathbb{R}^{n \times m}$ 은 특정한 이상이 존재할 때 잔차가 단방향성을 갖도록 설계되는 관측자의 이득행렬이다. 만약에 구동기나 센서에 이상이 발생했다면 이에 대해 다음과 같이 오차시스템을 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} e(k) &= (A - KC)e(k) + I_i \eta_i(k) \\ r(k) &= Ce(k) \end{aligned} \quad (23)$$

여기서,  $I_i \in \mathbb{R}^n$ 은 이상 방향 벡터로써 여기서는 구동기의 이상( $b_i \xi_i(k)$ )과 센서 이상( $I_i \eta_i(k)$ )을 동시에 표현하고 있다. 특히 뒤에 나오는 이상격리를 위해서는 출력분해조건을 만족해야하는데 이는 이상방향벡터  $I_i (i=1, 2, \dots, p)$ 는 이상사건  $p$ 에 대해서 벡터  $CI_1, CI_2, \dots, CI_p$ 가 선형독립이면 가능하다는 조건이다.

### 4.3 외란분리 이상검출필터와 견실한 이상격리

앞에서 소개한 이상검출필터는 시스템 동특성과 관련된 불확실적인 요소들을 고려하지 않기 때문에 UIO와의 결합으로써 이러한 단점을 해결한다. 외란을 고려한 시스템인 식(1)에서 오차시스템을 계산하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} e(k+1) &= (A - KC)e(k) + Ed(k) + b_i \xi_i(k) - k_i \eta_i(k) \\ r(k) &= Ce(k) + I_i \eta_i(k) \end{aligned} \quad (24)$$

위의 식으로부터 모든 이상과 외란이 잔차에 영향을 주는 것은 자명하다. 그러나 이 잔차가 이상검출과 격리에 사용된다면 외란과 이상을 분리하는 것이 쉽지 않다. 그러므로 신뢰성있는 진단을 위해서는 외란의 잔차 영향을 분리하는 것이 필수적이다. 여기서는 이러한 외란을 UIO를 사용하여 분리한다. 이때 발생한 잔차는 다음과 같다.

$$r(k) = y(k) - C\hat{x}(k) = (I - CH)y(k) - Cz(k) \quad (25)$$

이러한 UIO법을 이용한 잔차발생기를 식(20)과 같이 묘사된

시스템에 적용할 때 잔차와 상태추정오차는 다음과 같다. 만약  $i$  번째 구동기에 이상이 발생했다면,

$$\begin{aligned} e(k+1) &= (A_1 - K_1C)e(k) + T_b\xi_i(k) \\ r(k) &= Ce(k) \end{aligned} \quad (26)$$

유사하게  $j$  번째 센서에 이상이 발생했다면

$$\begin{aligned} e(k+1) &= (A_1 - K_1C)e(k) - k_{ij}\eta_j(k) - h_j\eta_j(k+1) \\ r(k) &= Ce(k) + I_j\eta_j(k) \end{aligned} \quad (27)$$

여기서,

$$A_1 = A - E[(CE)^TCE]^{-1}(CE)^TCA$$

이고,  $k_{ij}$ 는 행렬  $K_1$ 의  $j$  번째 열벡터이고  $h_j$ 는 행렬  $H$ 의  $j$  번째 열벡터이다. 위의 두 가지 오차시스템의  $r(k)$ 를 이용하여 다음과 같이 이상격리 신호를 발생한다. 우선 구동기의 이상격리 신호는,

$$CORR_j(k) = \frac{|(CTb_j)^T r(k)|}{\|CTb_j\|_2 \|r(k)\|_2} \quad (28)$$

또한 센서의 이상격리 신호는,

$$CORR_j^*(k) = \frac{|(r_j^*)^T r(k)|}{\|r_j^*\|_2 \|r(k)\|_2} \quad (29)$$

여기서,

$$r_j^*(k) = \Phi_j(\Phi_j^T \Phi_j)^{-1} \Phi_j^T r(k), \quad \Phi_j = [I_j \quad Ck_{ij} \quad Ch_j]$$

만약,  $CORR_j > CORR_k$  라면 이상은  $j$  번째 구동기(또는 센서)에서 발생했다고 판단한다.

### 5. 복합형 이상 검출 및 격리 시스템 설계

앞에서 제시한 계수추정법을 이용한 이상 검출법은 상태추정법보다 불확실한 요소에 견실할 뿐만 아니라, 검출성능 또한 뛰어난 것으로 알려져 있다. 그러나, 이 방법은 많은 계산량을 요구하는 방법이므로, 이상의 위치를 판단하기 위해서 구동기 또는 센서마다 이 계수추정법 이용하여 이상검출을 각각 하는 것은 무리가 있다. 또한, 상태추정기법(UIO)을 이용한 이상검출은 이상의 위치를 판단할 수 있어서 격리가 가능하나, 위의 식(34-35), 식(37-38)과 같이 구동기 고장이나 센서 고장에 대해서 각각 다른 형태의 오차시스템과 이상격리신호를 갖기 때문에, 이 방법을 적용하기 위해서는 이상 발생 장소가 센서인지 구동기인지는 구별을 할 수 있어야만 적용할 수 있는 방법이다. 그러므로, 이 두 방법을 결합시켜 각각의 방법이 가지고 있는 단점을 보완하는 방법을 생각한다.

이 두 방법을 결합시키는 기본형식은 계수추정법을 이상검출을 담당하고 상태추정법은 이상격리를 담당하는 것이다. 이의 이상 진단 흐름도는 다음 그림 1 과 같다.

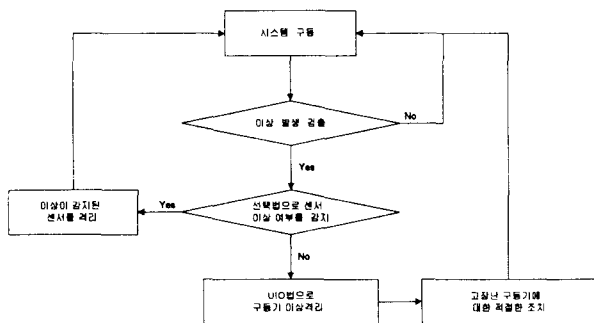


그림 1 복합형 이상검출 및 격리 흐름도  
Fig.1 Flowchart of hybrid fault detection and isolation

그림 1에서 보는 바와 같이 시스템이 구동하는 도중에 이상이 발생한 것을 계수추정법으로 검출이 되면, 이 이상이 센서 이상인지 판단한다. 여기에서, 센서에는 하드웨어적인 여유도를 두고 있는 것으로 가정하여 이상검출 후 센서의 이상 여부를 선택법(Voting technique)을 사용하여 판단한다. 이 후에 센서이상이라고 판단이 되면 이상이 있는 센서를 제거시키고 계속해서 시스템을 구동하고, 구동기 이상이라고 판단이 되면 상태공간법(여기서는 UIO 법)을 이용하여 이상을 격리하고 상황에 적절한 조치(구동기 교환이나 제어기교환)를 취한다.

여기서 사용되는 선택법을 살펴보면, 만약에 센서의 하드웨어 여유도가 3 개라고 할 때  $z_i(k)$ ,  $i = 1, 2, 3$  을 각각 이들의 출력이 라고 가정하면, 이 출력간의 각각의 차를 다음과 같이 정의한다.

$$e_1(k) = |z_1(k) - z_2(k)|, e_2(k) = |z_2(k) - z_3(k)|, e_3(k) = |z_3(k) - z_1(k)| \quad (30)$$

그리고,

$$d_i(k) = 1 + e_i^2(k), \quad i = 1, 2, 3 \quad (31)$$

$$\Delta_i(k) = \frac{d_i(k)}{\sum_{j=1}^3 d_j(k)} \quad (32)$$

여기서, 모든  $\Delta_i(k)$ 가 1/3 이 되면 모든 센서는 정상이라고 판단하고, 만약에 센서  $i$  에 이상이 발생했다고 가정하면 다음과 같은 식이 성립이 되어 고장이 발생한 센서를 찾을 수 있다.

$$\Delta_i(k) \approx 0, \quad \Delta_j(k) = 1/2 \quad (i \neq j)$$

### 6. 모의 실험

본 논문에서 제시하고 있는 알고리즘의 성능을 입증하기 위해서 여기서는 무인비행체(RPV; Remotely Piloted Vehicle)를 대상체로 선정하여 모의실험을 수행하였다. 이 대상체는 35,000 ft 의 순항한계고도를 가지고 있으며, 순항 마하수가 0.8 인 비행체이다.

여기서는 이 비행체의 횡운동 선형모델을 시뮬레이션 하였으며, 이 모델은 횡운동 선형모델의 입력변수는  $[\delta_r, \delta_l]^T$  이고, 상태변수로는  $[V \ P \ R \ \Phi]^T$  인 MIMO 시스템이다. 여기서  $V, P, R, \Phi$  는 각각 날개방향속도, 롤 각속도, 요우 각속도, 롤 각이다. 이 무인 비행체 선형모델은 고도 15,000ft , 마하 0.8 에서 선형화 시켰으며 시스템행렬은 다음과 같다[7].

$$A = \begin{bmatrix} -0.69 & 17.49 & -843.65 & 27.09 & -3.11 & -7778.8 & 2.98 & 7454.6 \\ -1.49 & -4.68 & 6.84 & 0 & 9.94 & 24846 & 6.56 & 16398 \\ 0.05 & -0.07 & -1.56 & 0 & 0.69 & 1732 & -0.59 & -1466.1 \\ 0 & 1 & 0.02 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -70 & -2500 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -70 & -2500 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

무인비행체의 횡운동 모델을 복합형 이상검출 및 격리에 적용시킨 전체 시뮬레이션의 블록선도는 다음 그림 2 와 같다.

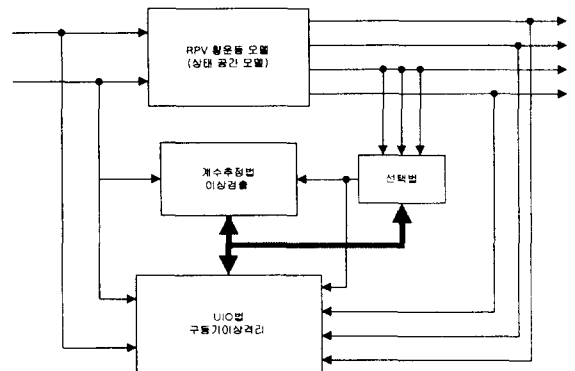


그림 2 복합형 이상검출 및 격리를 RPV 횡운동 모델에의 적용  
Fig 2. Application of hybrid FDI to RPV lateral model

앞의 블록선도에서 가는 실선은 각각의 신호가 진행되는 것을 나타내고, 굵은 실선은 이상검출기(계수 추정법)와 이상격리기(UIO와 선택법)에서의 판단 데이터를 주고 받는 것을 나타낸 것이다. 여기서 계수추정법을 이용한 이상검출에 사용되는 입력은  $\delta$  (Rudder deflation angle)이고 출력은  $R$ 로 선정하여 센서의 하드웨어 여유도를 3개 두고 있는 것으로 하였다. 선택기 시스템은 계수추정기에서 이상이 있음을 판단한 후에 동작을 하여, 이 후에 선택기에서 출력으로 나오는 신호는 이상이 없는 신호가 되게 한다.

만약 센서의 이상이 있는 것으로 예를 들면, 이상 발생 직후에 계수추정법을 이용한 이상검출기에서 이상을 검출하여 선택기를 작동시켜서 이상이 있는 센서를 격리시킨다. 또한 구동기에 이상이 있는 것을 예를 들면, 이상이 발생한 후에 이상검출기에서 이상을 검출하여 선택기로 판단을 지시하면 선택기에서는 이상을 검출하지 못한다. 이러한 경우(이상검출기에서는 이상판단을 내렸으나 선택기에는 이상이 검출되지 않은 경우)에는 구동기의 이상으로 판단하여 UIO 법을 이용한 구동기이상격리를 수행한다.

첫번째로 방향타(Rudder) 구동기에 이상이 발생한 경우를 시뮬레이션한 결과를 살펴보면 그림 3과 같이 계수추정법을 이용한 이상 검출에서의 시험변수를 볼 수 있다.

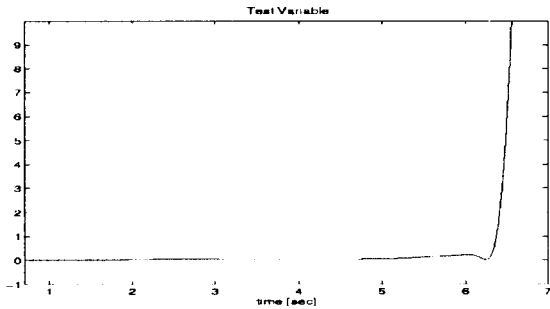


그림 3 방향타 구동기 이상 발생시의 이상검출 시험변수  
Fig 3. Fault detection test variable for rudder actuator fault

여기서는 시뮬레이션은 12 초까지 수행하였고 이상주입은 6 초에 이상을 발생시켰다. 위의 그림 3에서 보는 바와 같이 6 초 이후에 시험변수가 급격히 변화함에 따라 적절한 문턱값을 설정하여 이상 검출 시간을 조절할 수 있다. 이 이상이 검출된 후의 이상 격리 신호는 다음 그림 4와 같다.

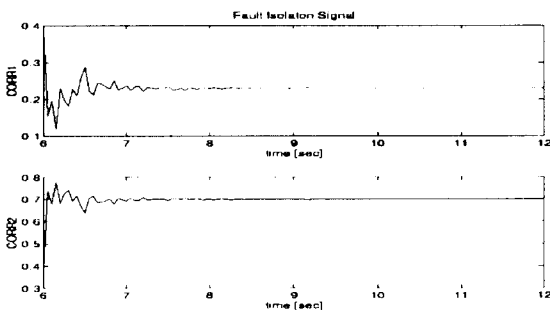


그림 4 방향타 구동기 이상 발생시의 이상격리 신호  
Fig 4. Fault isolation signal for rudder actuator fault

위의 그림 4에서  $CORR_1$ 은 보조익(Aileron) 구동기의 이상격리 신호이고  $CORR_2$ 는 방향타(Rudder) 구동기의 이상격리신호이다. 그림에서 볼 수 있듯이 이상격리신호는 이상이 검출된 뒤인 6 초부터 시작하는데 여기서는  $CORR_1 < CORR_2$ 가 되어 방향타 구동기에 이상이 발생한 것을 알 수 있다.

두 번째로 보조익(Aileron) 구동기에 이상이 발생한 경우로써 이 경우에도 역시 12 초까지의 시뮬레이션을 하였으며, 6 초에 이상을 주입하였다. 이 때의 이상검출 시험변수와 이상격리 신호는 각각 그림 5와 그림 6과 같다. 여기서도 역시 이상이 발생한 직후에 시험변수의 급격한 변화로 이상을 검출할 수가 있고, 이상격리신호도  $CORR_1 > CORR_2$ 가 되어 보조익에서의 이상격리를 할 수 있다.

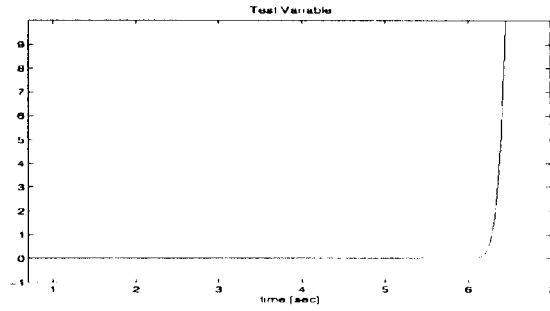


그림 5 보조익 구동기 이상 발생시의 이상검출 시험변수  
Fig 5. Fault detection test variable for aileron actuator fault

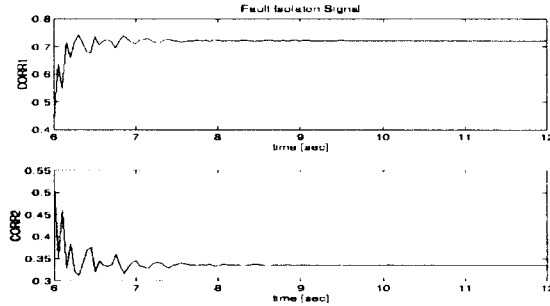


그림 6 보조익 구동기 이상 발생시의 이상격리 신호  
Fig 6. Fault isolation signal for aileron actuator fault

## 7. 결론

이 연구에서는 기존의 모델 기반 이상검출법에서의 서로 다른 두 가지 방법인 계수추정법을 이용한 방법과 관측자를 이용한 방법을 결합하여 새로운 이상 검출 및 격리 시스템을 구성하였다. 기존의 방법으로 이상격리를 하기 위해서는 각각의 단일기마다 이상 검출기를 장치해야 되었기 때문에 경제적인 문제 뿐만 아니라 계산량이 증가되어 시스템에 부담을 주었지만, 본 연구에서 제시하는 방법은 이상검출기를 한 개만 사용함으로써 기존의 단점을 보완하였다. 그러나, 이 방법으로는 정확한 이상의 절대적 크기를 알 수 없기 때문에 고장허용 제어등에 활용하기 위해서는 이에 관한 연구가 요구된다.

## 참고문헌

- [1] G. C. Goodwin, M. Geners and B. Ninness, "Quantifying the error in estimated transfer function with application to model order selection," *IEEE Trans. Automatic Control*, Vol. 37, pp. 913-928, 1992
- [2] J. Chen, R. J. Patton and Hong-Yue Zhang, "Design of unknown input observer and robust fault detection filter," *International Journal of Control*. Vol. 63, No. 1, pp. 85-105, 1996.
- [3] J. Gertler and K. Yin, "Statistical decision making for dynamic parity relations," *Proc. '96 IFAC World Congress*, Vol. N, pp. 13-18, 1996.
- [4] O. K. Kwon, G. C. Goodwin and W. H. Kwon, "Robust fault detection method accounting for modelling errors in uncertain system," *Control Eng. Practice*, Vol. 2, No. 5, pp. 763-771, Sep. 1994
- [5] P. M. Frank, "Enhancement of robustness in observer-based fault detection," *International Journal of Control*. Vol. 59, No. 4, pp. 955-981, 1994.
- [6] T. Hoffling and R. Isermann, "Adaptive parity equations and advanced parameter estimation for fault detection and diagnosis," *Proc. '96 IFAC World Congress*, Vol. N, pp. 55-60, 1996.
- [7] 권옥현, 권오규, 이상정, 김유단, 김상우, 이준화, "비행체계의 다변수 강인제어에 관한 연구(제 2 단계)," 국방과학연구소 연구결과보고서, pp. 18-30, 1996