

Composite Fault Detection and Isolation for Uncertain Systems

俞 浩 溶*, 金 臺 祐*, 權 五 圭**
(Ho-Jun Yoo, Dae-Woo Kim, Oh-Kyu Kwon)

Abstract - This paper proposes a composite fault detection and isolation method by combining the parameter estimation method[1] with the observer-based method[2] to take advantages of both methods. Some properties of the parameter estimation method and the observer-based method are reviewed, and the composite algorithm is presented. To exemplify the performance of the method proposed, some simulations applied to remotely piloted vehicle are performed.

Key Words : Fault detection, fault isolation, fault diagnosis, parameter estimation, unknown input observer

1. 서 론

최근에 들어서 산업공정들이 대형화·복잡화되고 정밀화됨에 따라서 이들 플랜트에 대한 이상검출 및 진단은 자동제어 시스템 분야에서 가장 중요한 문제 가운데 하나로 부각되어 왔다[1-4]. 이상(fault) 발생 직후에 이상의 조기 검출은 이상의 파급으로 인한 플랜트의 완전한 고장(failure)이나 이로 인한 다른 심각한 피해 등을 피하는데 중요한 역할을 하기 때문이다. 이상진단(fault diagnosis) 문제에는 이상의 발생을 관측하는 이상검출(fault detection)과 이상의 위치를 판단하는 이상격리(fault isolation)가 포함되는데, 최근 동향을 살펴보면 이상의 검출에 관한 연구는 활발히 진행되고 있는 반면에 이상의 위치를 검출하는 이상격리에 관한 연구는 미흡한 실정이다[3]. 따라서 이 논문에서는 이상검출 및 격리법을 연계하여 수행할 수 있는 복합형 이상검출 및 격리법을 제시하고자 한다.

이상검출 및 진단기법 중에서 대상 시스템의 모델을 이용하는 모델기반기법에는 상태추정을 이용한 기법(State estimation methods)과 계수추정을 이용한 기법(Parameter estimation methods)의 두 가지가 있다. 이 기법들은 모두 잔차 발생기를 이용하며, 잔차 발생기 구성형태에 따라 관측자를 이용한 기법은 등가공간법(Parity space method), 검출필터법(Detection filter methods), 미지입력관측자법(Unknown Input Observer, UIO)[2] 등으로 구분되고, 계수추정 기법은 계수추정과정에 사용되는 모델 및 추정 알고리즘의 형태에 따라 여러 형태가 제시되고 있다[1,4].

계수추정법은 시스템 이상에 대해서 검출감도가 상태추정

법보다 좋기 때문에 일단 이상검출만을 하기에는 적당한 방법이다. 그러나 계수추정법은 근본적으로 전달함수 모델을 기초로 하는 방법이기 때문에 이 방법으로는 시스템의 상태에 대한 정보를 알 수가 없다. 그러한 까닭에 계수추정법만으로는 이상에 대한 검출만이 가능할 뿐, 어떤 센서나 구동기에 이상이 발생했는가에 대한 정보를 추정하기는 어렵기 때문에 이상격리가 쉽지 않다는 문제점이 있다.

상태추정법은 미지입력관측자 등을 이용하여 이상의 격리[2]는 가능하나, 이를 위해서는 센서에서 발생하거나 구동기에서 발생하는 이상들에 대한 전달구조를 미리 알아야 한다는 전제를 하고 있다. 그러나 이러한 전제 조건은 대상공정에 대한 사전정보가 충분하지 못할 경우에는 만족될 수 없기 때문에 비현실적이며 여기에 이 기법의 문제점이 있다.

이와 같이 이상검출 및 진단분야에서 상태추정을 이용하는 기법과 계수추정을 이용하는 기법은 서로 다른 형태로 발전되어 왔으나, 앞에서 지적한 바와 같이, 각각 장단점을 갖고 있기 때문에 최근 들어 각 방법의 장점을 취합한 복합형태의 기법들이 요구되고 있다[5,6]. 이에 이 논문에서는 이러한 서로 다른 형태의 이상검출 기법을 함께 사용하여 보다 효과적인 이상진단 기법을 제시하고자 한다. 이 두 기법을 결합하면 계수추정법으로는 할 수 없었던 구동기/센서의 이상격리가 가능하고, 또한 UIO를 사용하는데 있어서 이상의 전달구조를 미리 알아야 한다는 전제가 계수추정법을 사용함으로써 해소되어 보다 우수한 이상검출 및 격리를 가능하게 한다.

2. 시스템 표현

이 논문에서는 상태추정에 의한 이상검출법을 적용하기 위해 시스템을 다음과 같이 표현한다.

$$\begin{aligned} x(k+1) &= Ax(k) + Bu(k) + Ed(k) + b_i \xi_i(k) \\ y(k) &= Cx(k) + I_i \eta_i(k) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, $x(k) \in \mathcal{R}^n$ 은 상태벡터이고, $u(k) \in \mathcal{R}^r$ 은 기지 입력 벡터, $d(k) \in \mathcal{R}^q$ 는 미지 입력(또는 외란)벡터이고, 행렬

* 正 會 員 : 仁 荷 大 電 氣 工 學 科 博 士 課 程
** 正 會 員 : 仁 荷 大 電 子 電 氣 計 算 機 工 學 部 教 授 · 工 博
接 受 日 字 : 1998년 2월 14일
最 終 完 了 : 1999년 1월 14일

A, B, C, E 는 기지의 행렬이다. $b_i \xi_i(k)$ 항은 이상이 i 번째 구동기에서 일어났음을 표현하는 항이고, $I_j \eta_j(k)$ 항은 j 번째 센서에서의 이상발생을 표현하는 항이다.

또한 계수추정법을 이용한 이상검출법[1]을 적용시키기 위해서 위에서 고려한 상태공간모델에 대응하는 전달함수 형태를 살펴보면 다음과 같다.

$$y(k) = G_T(q^{-1})u(k) + v(k) \\ = G(q^{-1}, \theta)u(k) + G_D(q^{-1})u(k) + v(k) \quad (2)$$

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

여기서, q^{-1} 는 지연 연산자이고, 실제 시스템 G_T 와 공칭 시스템 G 는 안정하고 인과적(causal)인 시스템이라 가정하고, 문제의 간략화를 위해 $\{v(\cdot)\}$ 는 분산이 σ^2 인 백색잡음이라 가정한다. 그리고,

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

$$B(q^{-1}, \theta, N_B) \equiv b_1 q^{-1} + b_2 q^{-2} + \dots + b_{N_B} q^{-N_B} \\ F(q^{-1}, N_F) \equiv 1 + f_1 q^{-1} + f_2 q^{-2} + \dots + f_{N_F} q^{-N_F} \\ \theta \equiv [b_1 \quad b_2 \quad \dots \quad b_{N_B}]^T \\ u_F(k) \equiv \frac{1}{F(q^{-1}, N_F)} \quad (5)$$

$$\eta(k) = G_D(q^{-1})u(k) = \sum_{i=0}^{N_d-1} h(i)u(k-i) \quad (6)$$

여기서, $F(q^{-1}, N_F)$ 는 사전에 정의된 고정 분모이고, 모델링 오차는 임펄스 응답 $h(\cdot)$ 의 형태로 표현된다. 이와 같이 사전에 고정된 분모를 사용하면 모든 이상의 영향을 분자계수의 변화로만 표현하게되어 계수가 이상에 대해 민감하게 변화하게되어 검출 감도가 높아진다. 위의 방정식을 간략화된 형태로 다시 쓰면 다음과 같다.

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

여기서,

$$Y = [y(1) \quad y(2) \quad \dots \quad y(N)] \\ \Phi = \begin{bmatrix} u_F(0) & u_F(-1) & \dots & u_F(1-N_B) \\ u_F(1) & u_F(0) & \dots & u_F(2-N_B) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ u_F(N-1) & u_F(N-2) & \dots & u_F(N-N_B) \end{bmatrix} \\ \Psi = \begin{bmatrix} u(1) & 0 & \dots & 0 \\ u(2) & u(1) & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ u(N) & u(N-1) & \dots & u(N-N_h+1) \end{bmatrix} \\ H \equiv [h(0) \quad h(1) \quad \dots \quad h(N_h-1)]^T \\ V \equiv [v(1) \quad v(2) \quad \dots \quad v(N)]^T$$

이며, N 은 주어진 데이터의 크기이다. 공칭 계수 벡터 θ 는 다음과 같이 일반적인 선형최소제곱법에 의해 구해진다.

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

추정오차는 다음과 같이 잡음 V 와 모델링오차 ΨH 로 분해할 수 있다.

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

여기서, $\hat{\theta}_1$ 와 $\hat{\theta}_2$ 를 각각 분산오차 및 편향오차라고 하고

다음과 같이 정의한다.

$$\hat{\theta}_1 \equiv (\Phi^T \Phi)^{-1} \Phi^T V \quad (10)$$

$$\hat{\theta}_2 \equiv (\Phi^T \Phi)^{-1} \Phi^T \Psi H \quad (11)$$

3. 계수추정을 이용한 이상검출

우선 동일한 시스템에서 정상적인 데이터와 시험대상 데이터가 각각 $I_n = \{Y_n, \Phi_n, \Psi_n\}$, $I_f = \{Y_f, \Phi_f, \Psi_f\}$ 로 주어진다고 가정하면, 이에 해당하는 모델식은 다음과 같다.

$$Y_n = \Phi_n \theta_n + \Psi_n H_n + V_n \quad (12)$$

$$Y_f = \Phi_f \theta_f + \Psi_f H_f + V_f \quad (13)$$

각각의 데이터 집합에 해당하는 최소 제곱법에 의한 추정계수는 다음과 같다.

$$\hat{\theta}_n = (\Phi_n^T \Phi_n)^{-1} \Phi_n^T Y_n \quad (14)$$

$$\hat{\theta}_f = (\Phi_f^T \Phi_f)^{-1} \Phi_f^T Y_f \quad (15)$$

Kwon 등[1]이 제시한 계수추정에 의한 이상검출법의 기본개념은 사전에 추정한 정상계수와 현재 추정한 계수간의 차이를 비교하는 것이다. 만약 관측된 변화가 모델링 오차와 잡음의 영향보다 큰 범위에 있으면 이상(fault)이 발생했다고 판단하는 것이다.

측정잡음과 모델링 오차는 서로 독립이므로 이상검출을 위한 시험변수를 생성하기 위해 이들 추정계수 편차의 상호분산을 계산하면 다음과 같다[1]:

$$C = E\{(\hat{\theta}_n - \hat{\theta}_f)(\hat{\theta}_n - \hat{\theta}_f)^T\} \\ = [(\Phi_n^T \Phi_n)^{-1} + (\Phi_f^T \Phi_f)^{-1}] \sigma^2 + (Q_n - Q_f) C_h (Q_n - Q_f)^T \quad (16)$$

여기서 $C_h = E\{HH^T\}Y$ 로서 사전정보로 주어지거나, 측정 데이터로부터 계산할 수 있다[1].

이상검출을 위한 시험변수는 위의 계수편차의 상호분산 함수로써 이루어진다. 이러한 시험변수는 여러 가지 형태의 표현이 가능하나, 이 논문에서는 Kullback정보(Kullback information)[8] 개념을 이용하여 다음과 같은 형태의 시험변수를 사용한다.

$$T_1 = (\hat{\theta}_n - \hat{\theta}_f)^T C^{-1} (\hat{\theta}_n - \hat{\theta}_f) \quad (17)$$

이러한 시험변수가 사전에 정해진 문턱값(threshold)을 초과하면 계수의 변화가 발생한 것으로 판단하여 시스템에 이상이 생긴 것으로 진단한다.

4. 미지입력관측자를 이용한 이상격리

4.1 미지입력관측자의 설계

이상격리신호를 발생하기 위해서 우선 미지입력관측자의 설계에 대해서 알아보자. 이 논문에서 사용하는 미지입력관측자는 Chen 등[2]에 의해 제시된 것이다. 식(1)에서 이상을 표현하는 항인 $b_i \xi_i(k)$ 항과 $I_j \eta_j(k)$ 항을 제외하고 불확실성이 고려된 시스템의 전차수 관측자의 구조는 다음과 같다.

$$z(k+1) = Fz(k) + Tbu(k) + Ky(k) \\ \hat{x}(k) = z(k) + Hy(k) \quad (18)$$

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

$$e(k+1) = x(k+1) - \hat{x}(k+1) = Fe(k) \quad (19)$$

여기서, $K = K_1 + K_2$, $K_2 = FH$, $T = I - HC$

$$F = A - HCA - K_1C, \quad H = E[(CE)^TCE]^{-1}(CE)^T$$

이고, F 는 관측자의 시스템 행렬로써 K_1 을 조정하여 모든 고유치들이 안정하게 설계되어야 한다. 또한 위에서 H 는 미지입력관측자의 존재조건을 만족시키기 위한 식 중에 하나인 $(HC - D)E = 0$ 의 특이해인데, 이 특이해가 성립하기 위해서는 $rank(CE) = rank(E)$ 라는 조건을 만족해야 한다.

4.2 이상검출필터

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

$$\begin{aligned} \hat{x}(k+1) &= A\hat{x}(k) + Bu(k) + K(y(k) - C\hat{x}(k)) \\ r(k) &= y(k) - C\hat{x}(k) \end{aligned} \quad (20)$$

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

$$\begin{aligned} e(k+1) &= (A - KC)e(k) + l_i\eta(k) \\ r(k) &= Ce(k) \end{aligned} \quad (21)$$

여기서, $l \in \mathcal{R}^n$ 은 이상 방향 벡터로서 여기서는 구동기의 이상 $(b_i, \xi_i(k))$ 과 센서 이상 $(I_i, \eta_i(k))$ 을 동시에 표현하고 있다. 또한 이상격리 가능하게 하기 위해서는 이상방향벡터가 출력 분해조건을 만족해야하는데, 이 출력분해조건이란 이상방향벡터 $l_i (i = 1, 2, \dots, p)$ 가 이상 사건 p 에 대해서 벡터 Cl_1, Cl_2, \dots, Cl_p 가 선형독립이면 이러한 서로 독립적인 방향을 갖고 있는 이상에 대해서는 격리가 가능하다는 조건이다.

4.3 외란분리 이상검출필터와 견실한 이상격리

앞에서 소개한 이상검출필터는 시스템 동특성과 관련된 불확실적인 요소들을 고려하지 않기 때문에 이상검출의 견실성을 위해 UIO와 결합함으로써 이러한 단점을 해결한다. 외란을 고려한 시스템인 식(1)에서 오차 시스템을 계산하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} e(k+1) &= (A - KC)e(k) + Ed(k) + b_i\xi(k) - k_j\eta_j(k) \\ r(k) &= Ce(k) + I_j\eta_j(k) \end{aligned} \quad (22)$$

위의 식으로부터 모든 이상과 외란이 잔차에 영향을 주는 것은 자명하다. 그러나 이 잔차가 이상검출과 격리에 사용된다면 외란과 이상을 분리하는 것이 쉽지 않다. 그러므로 신뢰성 있는 진단을 위해서는 외란이 잔차에 미치는 영향을 분리하는 것이 요구된다. 여기서는 이러한 외란을 UIO를 사용하여 분리하는데, 이 경우에 발생하는 잔차는 다음과 같다.

$$r(k) = y(k) - C\hat{x}(k) = (I - CH)y(k) - Cz(k) \quad (23)$$

이러한 UIO법을 이용한 잔차발생기를 식(18)과 같이 묘사된 시스템에 적용할 때 잔차와 상태추정오차는 다음과 같다. 만약 i 번째 구동기에 이상이 발생했다면,

$$\begin{aligned} e(k+1) &= (A_1 - K_1C)e(k) + Tb_i\xi_i(k) \\ r(k) &= Ce(k) \end{aligned} \quad (24)$$

유사하게 j 번째 센서에 이상이 발생했다면

$$\begin{aligned} e(k+1) &= (A_1 - K_1C)e(k) - k_{1j}\eta_j(k) - h_j\eta_j(k+1) \\ r(k) &= Ce(k) + I_j\eta_j(k) \end{aligned} \quad (25)$$

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

이고, k_{1j} 는 행렬 K_1 의 j 번째 열벡터이고 h_j 는 행렬 H 의 j 번째 열벡터이다.

위의 두 가지 오차시스템의 $r(k)$ 를 이용하면 이상격리 신호를 구성할 수 있다. 우선 구동기의 이상격리 신호는 다음과 같다.

$$CORR_i(k) = \frac{|(CTB_i)^T r(k)|}{\|CTB_i\|_2 \|r(k)\|_2} \quad (26)$$

또한 센서의 이상격리 신호는 다음과 같다.

$$CORR_j(k) = \frac{(r_j^*)^T r(k)}{\|r_j^*\|_2 \|r(k)\|_2} \quad (27)$$

여기서,

$$\Phi_j = [I_j \quad Ck_{1j} \quad Ch_j]$$

$$r_j^*(k) = \Phi_j (\Phi_j^T \Phi_j)^{-1} \Phi_j^T r(k)$$

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

5. 복합형 이상검출 및 격리 시스템 설계

앞에서 제시한 계수추정을 이용한 이상검출법은 상태추정법보다 불확실한 요소에 견실할 뿐만 아니라, 검출성능도 우수한 것으로 알려져 있다. 그러나, 이 방법은 많은 계산량을 요구하는 방법이므로, 이상의 위치를 판단하기 위해서는 구동기 또는 센서마다 이 계수추정법을 적용하여 이상 검출을 수행하여야 하는데, 이는 경제적인 측면이나 계산량 문제 등에서 무리가 있는 방법이다. 한편, 상태추정기(여기서는 UIO)를 이용한 이상검출법은 이상의 위치를 판단할 수 있어서 격리가 가능하지만, 위의 식(24)~(25), 식(26)~(27)과 같이 구동기 고장이나 센서 고장에 대해서 각각 다른 형태의 오차시스템과 이상격리신호를 갖기 때문에, 이 방법을 적용하기 위해서는 이상발생위치가 센서인지 구동기인지는 사전에 구별을 할 수 있어야 한다는 문제점이 있다. 그러므로, 여기에서는 이 두 방법을 결합시켜 각각의 방법이 가지고 있는 단점을 보완하는 방법을 제안한다. 이 두 방법을 결합시키는 기본형식은 계수추정법은 이상검출을 담당하고 상태추정법은 이상격리를 담당하는 것이다. 이의 이상진단 흐름도는 다음 <그림1>과 같다.

<그림1>에서 보는 바와 같이 시스템이 구동하는 도중에 이상이 발생한 것을 계수추정법으로 검출이 되면, 이 이상이

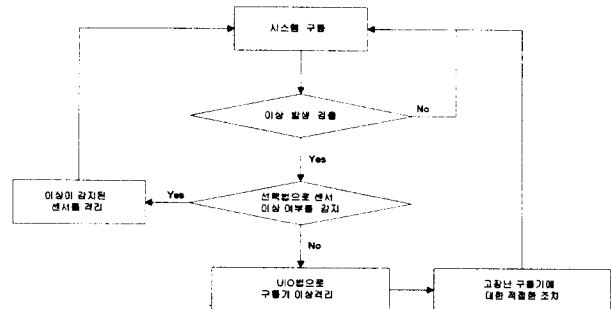


그림 1 복합형 이상검출 및 격리 흐름도
Fig.1 Flowchart of hybrid fault detection and isolation

센서 이상인지의 여부를 판단한다. 여기에서, 센서에는 하드웨어적인 여유도를 두고 있는 것으로 가정하여 이상검출 후 센서의 이상 여부는 선택법(voting technique)을 사용하여 판단한다. 센서이상이라고 판단이 되면 이상이 있는 센서를 제거시키고 계속해서 시스템을 가동하며, 상태추정법(여기서는 UIO법)을 이용하여 구동기 이상이 판단이 되면 이상을 격리하고 상황에 적절한 조치(구동기나 제어기 교환)를 취한다.

여기서 센서의 이상여부를 판단하기 위해 사용되는 선택법을 정리하면 다음과 같다. 만약에 센서의 하드웨어 여유도가 3개라고 할 때, $z_i(k)$, $i = 1, 2, 3$ 을 각각 이들의 출력이라고 가정하면, 이 출력간의 각각의 차를 다음과 같이 정의한다.

$$\begin{aligned} e_1(k) &= |z_1(k) - z_2(k)| \\ e_2(k) &= |z_2(k) - z_3(k)| \\ e_3(k) &= |z_3(k) - z_1(k)| \end{aligned} \quad (28)$$

그리고, $d_i(k) = 1 + e_i^2(k)$, $i = 1, 2, 3$

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

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

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

위의 표현에서 허용오차는 사용하는 센서의 감도나 측정 잡음에 따라 그 오차의 한계가 정의된다.

6. 모의 실험

6.1 대상 시스템 모델

이 논문에서는 모의실험 대상 시스템으로서 원격조종 비행체(RPV ; Remotely Piloted Vehicle)를 사용한다. RPV에 부과되는 임무가 고도화됨에 따라 이 계통에서의 이상검출 및 격리는 중요한 문제로 부각되고 있다. 여기서는 이 비행체의 횡운동 비선형 모델에 대한 선형화모델을 써서 이상검출을 수행하는 모의실험하였으며, 이 횡운동 선형모델은 입력변수가 $[\delta_a \delta_r]^T$ 이고, 출력변수로는 $[VPR\phi]^T$ 를 갖는 다변수 시스템이다. 여기서, V, P, R, ϕ 는 각각 날개방향속도, 롤 각속도, 요우 각속도, 롤 각이다. 이 무인비행체 선형 모델은 고도 15,000ft, 마하 0.8에서 선형화하여 구한 것으로서 시스템행렬은 다음과 같다[9].

$$A = \begin{bmatrix} -0.69 & 17.49 & -843.65 & 27.09 & -3.11 & -7778.8 & 2.98 & 7454.6 \\ -1.49 & -4.68 & 6.84 & 0 & 9.94 & 24846 & 6.56 & 16398 \\ 0.65 & -0.07 & -1.56 & 0 & 0.69 & 1732 & -0.59 & -1466.1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -70 & -2500 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -70 & -2500 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

6.2 모의실험

앞 절에서 소개한 대상체인 RPV의 횡운동 모델에 이 논문에서 제시한 이상검출 및 격리법을 적용시켜 모의실험을 수행하였다. 이 모의실험에서는 샘플링 시간을 0.01초로 선정하고 총 모의실험 시간은 12초로 선정하였다.

또한 이상검출 및 격리는 실제적으로 실시간으로 처리하는 알고리즘이어야 하므로 이를 위해서 계산량을 줄이는 것이 필수적이다. 이상검출을 하기 위해서는 현재 시점에서부터 상대적으로 먼 과거의 데이터는 사실 불필요하기 때문에 계

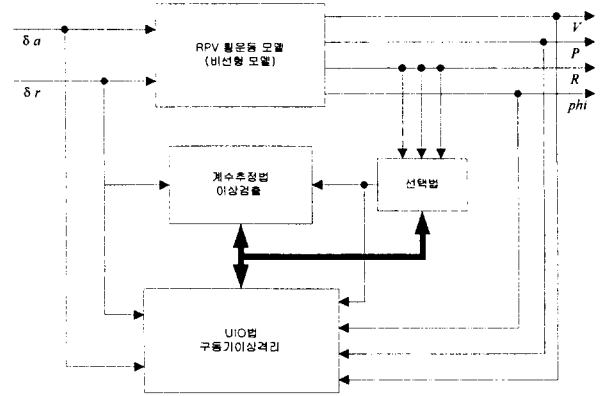


그림 2. RPV 횡운동 모델에의 적용
Fig 2. Application of hybrid FDI to RPV lateral model

산량을 위해서는 현재 시점에서 N 개만큼의 데이터를 갖고 이상검출 및 격리를 한다. 이를 위해서 이 연구에서는 고정 구간 이동창(FISW ; Fixed Interval Sliding Widows) 기법을 사용하여 각각의 시점 k 에서의 가장 최근 측정치 N 개만을 사용하는 것으로 제한을 둔다.

무인비행체의 횡운동 모델을 복합형 이상검출 및 격리에 적용시킨 전체 모의실험 블록선도는 위의 <그림 2>와 같다. 여기서 입력력 데이터는 비선형모델로부터 구하고 이상검출 및 격리과정에는 선형화 모델을 사용한다. 따라서 모의실험 대상 모델에는 선형화 오차에 의한 모델링 오차가 존재한다.

<그림 2>의 블록선도에서 가는 실선은 각각의 신호가 진행하는 것을 나타내고, 굵은 실선은 이상검출기(계수추정법)와 이상격리기(UIO와 선택법)에서의 판단 데이터를 주고받는 것을 나타낸 것이다. 여기서 계수추정법을 이용한 이상검출에 사용되는 입력은 δ_r (방향타 편향각)이고 출력은 R (요 각속도)로 선정하였으며, 센서의 하드웨어 여유도를 3개 두고 있는 것으로 하였다. 선택기 시스템은 계수추정법에서 이상이 있음을 판단한 후에 동작을 하여, 이 후에 선택기에서 출력으로 나오는 신호는 이상이 없는 신호가 되게 한다.

만약 센서에 이상이 있는 경우에는, 이상 발생 직후에 계수추정법을 이용한 이상검출기에서 이상을 검출하여 선택기를 작동시켜서 이상이 있는 센서를 격리시킨다. 또한 구동기에 이상이 있는 경우에는, 이상이 발생한 후에 이상 검출기에서 이상을 검출하여 선택기로 판단을 지시하지만 선택기에서는 이상을 검출하지 못한다. 따라서 이 경우 즉, 이상검출기에서는 이상판단을 내렸으나 선택기에는 이상이 검출되지 않은 경우에는 구동기의 이상으로 판단하여 UIO법을 이용한 구동기 이상격리를 수행한다.

불확정시스템에서의 건설한 이상검출을 위한 시스템의 불확실성과 초기 설정 계수는 다음과 같다.

- (a) 입력잡음 표준편차 : $\sigma_u = 0.001$
- (b) 출력잡음 표준편차 : $\sigma_y = 0.002$
- (c) 고정 구간 창(FISW)의 크기 : $N = 100$

여기에서, 고정 구간 창(FISW)의 크기는 플랜트의 특성에 따라 정성적으로 결정하는데 이 논문에서도 이를 시행착오적으로 구하여 모의실험을 수행하였다.

구동기 이상격리를 위한 설계방법은 다음과 같다. 우선 정상일 때의 시스템 방정식을 살펴보면,

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) + Ed(x(k))$$

여기서, $Ed(x)$ 항은 모델링 오차를 표시하는 항이고, 벡터 $d(x(k))$ 는 다음과 같이 상태 변수들과 연관된 항으로 가정하였다.

$$d(x) = 10^4 \times [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5 \ x_6 \ x_7 \ x_8]^T$$

여기서, 분포행렬 E 는 최소제곱법에 기반을 둔 식별이론을 적용해서 얻을 수 있다. 입력 u 에 관해서 이들의 순차적인 값 $u^{(1)}, u^{(2)}, \dots, u^{(M)}$ 이 주어진다면, 이에 대응하는 정상 응답 $x^{(1)}, x^{(2)}, \dots, x^{(M)}$ 과 $d^{(1)}, d^{(2)}, \dots, d^{(M)}$ 을 구할 수 있다. 정상상태 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} Ax^{(1)} + Bu^{(1)} + Ed^{(1)} &= 0 \\ Ax^{(2)} + Bu^{(2)} + Ed^{(2)} &= 0 \\ &\vdots \\ Ax^{(M)} + Bu^{(M)} + Ed^{(M)} &= 0 \end{aligned}$$

만약 N 이 $d(x)$ 의 차수보다 크다면, 행렬 E 의 최소제곱 추정은 다음과 같이 주어진다.

$$\hat{E} = (E^* \Omega)^T$$

여기서, E^* 는 E 의 가역행렬(pseudo inverse)이다

$$E^* = \begin{bmatrix} (d^{(1)})^T \\ (d^{(2)})^T \\ \vdots \\ (d^{(M)})^T \end{bmatrix}^T \Omega = - \begin{bmatrix} (Ax^{(1)} + Bu^{(1)})^T \\ (Ax^{(2)} + Bu^{(2)})^T \\ \vdots \\ (Ax^{(M)} + Bu^{(M)})^T \end{bmatrix}$$

이런 절차로 모의실험을 하여 얻은 \hat{E} 행렬은 다음과 같다.

$$\hat{E} = \begin{matrix} 9.9084e-05 & -1.7499e-03 & 8.4365e-02 & -2.7090e-03 & 1.3533e-11 & 7.7788e-01 & 1.6082e-11 & -7.4546e-01 \\ 1.4899e-04 & 4.6831e-04 & -6.8365e-04 & 1.7534e-18 & -9.3029e-12 & -2.4846e+00 & -1.8794e-11 & -1.6398e+00 \\ -5.0823e-06 & 7.1384e-06 & 1.5601e-04 & 9.3910e-20 & -2.8493e-12 & -1.7320e-01 & -3.4235e-12 & 1.4661e-01 \\ 3.1538e-20 & -1.0000e-04 & -2.0635e-06 & -2.6107e-20 & 2.1551e-17 & 9.9981e-17 & 4.3538e-18 & 3.4021e-16 \\ -3.6834e-07 & 8.9141e-04 & -1.3060e-04 & 1.4669e-06 & 1.5293e-12 & 1.5377e-01 & 2.0789e-12 & -1.1592e-02 \\ 9.2958e-21 & 2.1610e-17 & -2.8389e-18 & 4.0028e-20 & -1.5788e-26 & -9.3108e-16 & -1.8852e-26 & 8.4345e-16 \\ -3.6834e-07 & 8.9141e-04 & -1.3060e-04 & 1.4669e-06 & -2.9071e-12 & -9.6232e-02 & -3.1734e-12 & 2.3841e-01 \\ 1.9062e-20 & 4.3995e-18 & -2.2163e-18 & 9.5070e-21 & -1.8853e-26 & -1.2910e-15 & -2.3226e-26 & 8.0996e-16 \end{matrix}$$

여기서, \hat{E} 는 전열계수(full column rank)행렬이 아니므로 ($rank(\hat{E}) = 6 \neq 8$), E_1 이 전열계수 행렬이 되도록

$\hat{E} = E_1 E_2$ 로 분해한다. 이렇게 검출필터에서 사용하도록 설계된 행렬 E_1 은 다음과 같다. ($rank(E_1) = 8$)

$$\hat{E}_1 = \begin{matrix} 9.7357e-01 & -6.5499e-03 & -2.2829e-01 & -1.4420e-03 & -6.5909e-06 & 5.8747e-05 & 4.4566e-15 & -1.1630e-15 \\ -1.2015e-01 & -8.6395e-01 & -4.8781e-01 & 3.4390e-02 & -3.5450e-04 & 3.1756e-03 & 2.4088e-13 & -6.2475e-14 \\ 1.6610e-03 & 3.9696e-02 & -3.2647e-04 & 9.9545e-01 & -9.6027e-03 & 8.6027e-02 & 6.5310e-12 & -1.6928e-12 \\ 1.5232e-02 & -3.9587e-02 & 6.6888e-02 & -8.4787e-02 & -1.1035e-01 & 9.8710e-01 & 7.4857e-11 & -1.9522e-11 \\ -1.3692e-01 & 3.5383e-01 & -5.9391e-01 & -1.8905e-02 & 6.9666e-01 & 1.3281e-01 & 1.0072e-11 & -2.6095e-12 \\ -3.3220e-15 & 8.4525e-15 & -1.4423e-14 & 3.4245e-15 & 3.2987e-15 & -5.5100e-11 & 5.0088e-01 & -8.6532e-01 \\ -1.3692e-01 & 3.5383e-01 & -5.9391e-01 & -1.8884e-02 & -7.0879e-01 & -2.4314e-02 & -1.8606e-12 & 4.8212e-13 \\ -6.9470e-16 & 1.5847e-15 & -2.9386e-15 & -1.0518e-14 & -1.5906e-14 & -5.5733e-11 & 8.6552e-01 & 5.0088e-01 \end{matrix}$$

그리고, 검출필터에서의 필터의 고유치는 모두 -2 라 가정하고 설계하였다.

6.3 모의실험 결과

이 논문에서는 이상 시나리오를 방향타 구동기 이상과 보조익 구동기 이상의 두 가지로 가정을 하고 실험하였다. 첫 번째로 방향타(rudder) 구동기에 이상이 발생한 경우의 모의

실험 결과를 살펴보면 <그림 3>과 같은 계수추정법을 이용한 이상검출 시험변수를 볼 수 있다. 여기서 12초 동안의 모의실험 중에서 이상주입은 6초에 이상을 발생시켰다. <그림 3>에서 보는 바와 같이 6초 이후에 시험변수가 급격히 변화함에 따라 적절한 문턱값을 설정하여 이상검출 시간을 포착할 수 있음을 알 수 있다. 이상이 검출된 후의 이상격리 신호는 다음 <그림 4>와 같다.

<그림 4>에서 $CORR_1$ 은 보조익 구동기의 이상격리 신호이고 $CORR_2$ 는 방향타 구동기의 이상격리 신호이다. 그림에서 볼 수 있듯이 이상격리 신호는 이상이 검출된 뒤인 6초부터 시작하는데 여기서는 $CORR_1 < CORR_2$ 가 되어 방향타 구동기에 이상이 발생한 것을 알 수 있다. 두 번째로 보조익(aileron) 구동기에 이상이 발생한 경우로서 이 경우에도 역시 12초까지 모의실험을 하였으며, 6초에 이상을 주입하였다. 이 때의 이상검출 시험변수와 이상격리 신호는 각각 <그림 5, 6>과 같다. 여기서도 역시 이상이 발생한 직후에 시험변수의 급격한 변화로 이상을 검출할 수 있고, 이상격리 신호도 $CORR_1 > CORR_2$ 가 되어 보조익에서의 이상격리를 할 수 있음을 볼 수 있다.

7. 결론

이 논문에서는 기존의 모델 기반 이상검출법에서의 서로 다른 두 가지 방법인 계수추정을 이용한 방법과 관측자를 이용한 방법을 결합하여 복합형 이상검출 및 격리 시스템을 구성하였다. 이 논문에서 초점을 두고 있는 바는 이상의 검출 뿐만 아니라 이상의 격리도 함께 수행하는 것이다. 기존의 방법으로 이상격리를 하기 위해서는 각각의 구동기 또는 센서 단일기마다 이상검출기를 장치해야 되기 때문에 경제적 인 문제뿐만 아니라 계산량이 증가되어 시스템에 부담을 주었다. 그러나 이 논문에서 제시하는 방법은 단일 이상검출기와 이상격리기를 사용함으로써 단점을 보완하였다.

이 논문에서 제시하는 이상검출 및 격리가 된 다음에 고장 허용제어(fault tolerant control) 등에 활용하기 위해서는 이에 관한 추가적 연구가 요구된다. 또한 이상검출의 판단을 위한 문턱값(threshold)은 이상의 유무를 결정하기 위한 중요한 요소이나 이를 정량적으로 결정하는 방법은 아직까지 미흡한 실정이다. 이에 기준입력(reference)이 변화함에 따라서 적응적으로 대처하는 문턱값의 알고리즘 개발이 필요한 차후 과제라 할 수 있다.

본 논문은 인하 현대 연구비의 1998년도 지원으로인한 연구결과임을 밝히며 감사의 말씀을 드리고자 합니다.

참고 문헌

- [1] Kwon, O.K., 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.

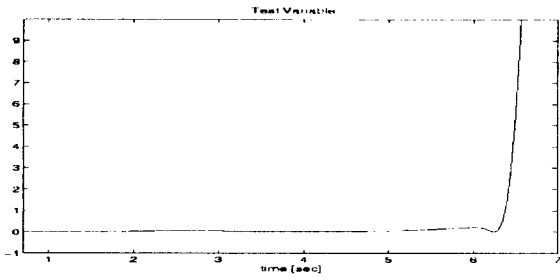


그림 3 방향타 구동기 이상 발생시의 이상검출 시험변수
Fig 3. Fault detection test variable for rudder actuator fault

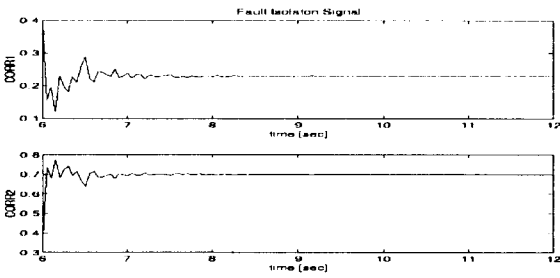


그림 4. 방향타 구동기 이상 발생시의 이상격리 신호
Fig 4. Fault isolation signal for rudder actuator fault

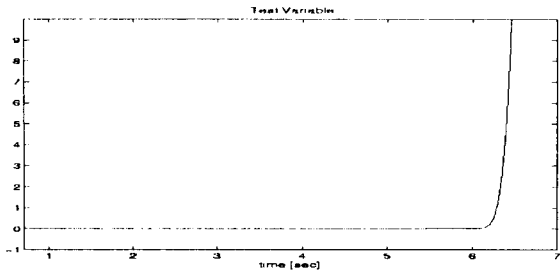


그림 5 보조익 구동기 이상 발생시의 이상검출 시험변수
Fig 5. Fault detection test variable for aileron actuator fault

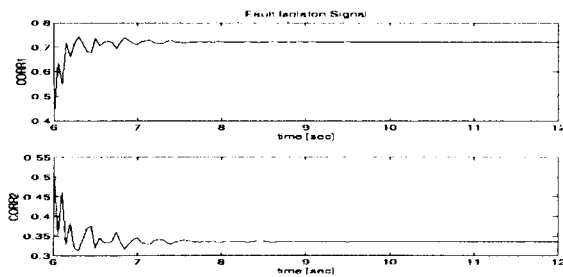


그림 6. 보조익 구동기 이상 발생시의 이상격리 신호
Fig 6. Fault isolation signal for aileron actuator fault

[2] Chen, J., R.J. Patton and Hong-Yue Zhang. "Design of unknown input observer and robust fault detection filter," *Int. Journal of Control*. Vol. 63, No. 1, pp. 85-105, 1996.
[3] Frank, P.M., "Fault diagnosis in dynamic systems

using analytical and knowledge-based redundancy - a survey and some new results," *Automatica*, vol.26. No. 3, pp. 459-474, 1990.

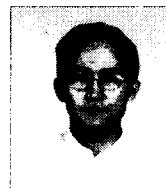
[4] Frank, P.M., "Enhancement of robustness in observer-based fault detection," *Int. Journal of Control*. Vol. 59, No. 4, pp. 955-981, 1994.
[5] Gertler, J.J. and K. Yin, "Statistical decision making for dynamic parity relations," *Proc. '96 IFAC World Congress*, Vol. N, pp. 13-18, 1996.
[6] Hofling, T. 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] Goodwin, G.C. and M.E. Salgado. "A stochastic embedding approach for quantifying uncertainty in the estimation of restricted complexity model." *Int. Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 3, pp. 333-356, 1989.
[8] Michele Basseville and Igor V. Nikiforov, *Detection of Abrupt Changes - Theory and Application*, Prentice-Hall Inc., 1993.
[9] 권옥현, 권오규, 김유단, 김상우, 이준화, "비행체계의 다변수 강인제어에 관한 연구(제2단계)," 국방과학연구소 연구결과보고서, pp. 18-30, 1996.

저 자 소 개



유 호 준(俞浩漣)

1973년 4월 1일생. 1996년도 인하대학교 전기공학과 졸업. 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1998년~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정



김 대 우(金臺祐)

1988년도 인하대학교 전기공학과 졸업. 1990년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 1990년 ~ 1995년 LG산전연구소. 1995년 ~ 1996년 국립공업기술연구원. 1996년 ~ 현재 인하대학교 전기공학과 박사과정



권 오 규(權五圭)

1953년 11월 14일생. 1978년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1980년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1985년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1988~1989년 호주 뉴캐슬대 전기전산공학과 객원교수.

현재 인하대 공대 전자전기컴퓨터 공학부 전기 및 제어전공 교수