

좌 고유구조지정법 기반 견실 고장 분리 필터 설계 및 비행체 시스템에의 응용

A Robust Fault Isolation Filter Design Based on Left Eigenstructure Assignment and its Application to a Flight System

이 대 영, 최 재 원
(Dae Young Lee and Jae Weon Choi)

Abstract : In this paper, we propose a novel robust fault isolation filter design method using the left eigenstructure assignment scheme proposed by the authors. The proposed method guarantees that the r simultaneous faults can be isolated when the number of available output measurements is r . Moreover, if there exist redundant output measurements, the eigenvalues of the filter system can be assigned to the desired position or the filter can be designed robustly to the system parameter variation. Liu & Si developed a filter design method which has the same purpose, fault isolation. However their method cannot use the redundant freedom of the output matrix C . The proposed filter can use the redundant freedom of the matrix C effectively. Beside this, in this paper, an eigenstructure assignment methodology that satisfies the required fault isolation conditions is also proposed. The proposed fault isolation filter was applied for isolating the simultaneous faults to a VTOL aircraft in order to verify the fault isolation performance.

Keywords : robust fault isolation filter, simultaneous faults, left eigenstructure assignment

I. 서론

동적 시스템의 고장 감지 및 분리는 실제 산업 현장에서의 필요가 계속 증대함에 따라 다양한 연구가 이루어지고 있다[1]. 현재 연구가 진행되고 있는 여러 다양한 방법 중 본 연구에서 주로 다루어지고 있는 분야인 잔류오차 분석 기법은 구동기의 제어입력과 센서의 출력을 시스템의 동역학 모델식과 연관하여 실제 상태 출력과 모델식에서 구성된 상태를 일치시키는 방법을 사용한다. 이러한 잔류오차 분석을 통한 고장 분리의 바람직하지 못한 결과는 동적 시스템의 모델링 오차, 또는 파라미터 변동 등과 같은 요소들이 고장의 감지 및 분리 결과에 혼동을 줄 수 있다는 점[2][3]과 동시 고장의 분리가 하나의 필터로는 성취하기 어렵다는 것[4]이었다.

특히 Observer Method(OM)에 속하는 미지 입력 관측기(unknown input observer)[2][3]를 이용한 고장 감지 및 분리 방법은 구동기 고장을 시스템의 미지입력으로 간단히 모델링할 수 있기 때문에 고장 감지 및 분리에 효과적으로 사용될 수 있으나, 동시 고장을 감지 및 분리 할 때는 여러 개의 필터가 제공되어야 한다는 문제가 있었다. Liu와 Si[4]는 이러한 단점에 착안한 새로운 필터 설계 방법을 제시하였는데, 제안된 필터 설계 방법은 동시 고장을 하나의 전 상태(full state) 관측기를 통하여 근사적으로 분리하는데 목적을 두고 정상상태 피드백 불연성화(decoupling) 방법으로 문제를 해결하였다. 불연성화 방법이란 서로 영향을 미치는 두 상태를 분리하는 방

법으로 이러한 방식으로 설계된 필터는 r 개의 출력 측정치만 있으면, r 개의 동시 고장을 근사적으로 분리할 수 있다. 그러나 이 필터 설계방법은 동시 고장의 수만큼 고유치를 원하는 곳으로 지정할 수 있기 때문에 항상 $(n-r)$ 개의 지정할 수 없는 고유치가 생기게 되고(여기서, n 은 시스템의 차수), 더욱이 근사적인 고장 분리의 결과는 이러한 고유치가 불안정할 때에는 얻어질 수 없으며, 여분의 출력 측정치가 존재하더라도, 설계에는 활용할 수 없다는 치명적인 단점을 가지고 있었다.

이에 참고문헌 [1]에서는 좌 고유구조지정 개념[5]을 관측기에 도입한 새로운 고장 분리 필터 설계방법을 제안했다. 제안된 설계방법은 Liu와 Si의 관측기가 가진 문제점들인 여분의 출력 측정치 활용 문제와 지정 불가능 고유치 문제를 해결하여 적용 가능한 시스템의 범위를 넓혔으나, 대신 출력 측정치가 고장의 개수보다 1개 더 많아야 한다는 단점이 있었다. 또한 잔류오차 분석 기법은 수학적 모델에 기초한 방법이므로, 모델링 오차나 파라미터 변동이 있으면 필터 설계목적에 부합하는 결과들을 얻을 수 없다. Liu와 Si의 필터[4]와 참고문헌 [1]에 제시된 필터도 예외는 아니어서 만일 실제 시스템의 파라미터 중 모델링된 식과 다른 것이 있으면 고장 분리의 결과는 얻어질 수 없다. 이와같은 이유 때문에 많은 고장 감지 및 분리를 위한 관측기 설계에서 시스템의 불확실성을 다루는 문제들은 매우 중요하게 다루어지고 있다. Saif와 Guan은 참고문헌 [2]에서 구조화된 시스템 파라미터 변동을 외란의 형식으로 모델링한 후, 이러한 모델에 대하여 견실한 상태 관측기 설계법을 제시하였고, Hwang등[6]은 시스템 출력 행렬(C)과 고장행렬(E)의 곱 CE 의 역행렬을 이용한 전달함수 행렬로 견실한

접수일자 : 2000. 10. 16., 수정완료 : 2001. 2. 1.

이대영 : (주)현대중공업 기전연구소 시스템제어연구실(portrait@hhi.co.kr)

최재원 : 부산대학교 기계공학부(choijw@hyowon.pusan.ac.kr)

고장 분리를 수행하기도 하였다.

본 논문에서는 참고문헌 [1]에 제시된 고장 분리 필터의 출력 측정치 개수가 고장의 개수보다 많아야 한다는 조건을 완화시켜 출력 측정치 개수가 고장의 수와 같을 때에도 필터 설계가 가능하도록 하였고, Saif와 Guan이 제시한 파라미터 변동 모델링을 고장 분리에 적용하여서 구조화된 시스템 파라미터 변동에 대하여 견실한 고장 분리 필터를 설계하였다. 뿐만 아니라 앞서 참고문헌 [1]에서 제시된 고장 분리를 위한 좌 고유구조지정 조건 및 설계법을 정리와 보조정리 형태로 정리하였다.

II. 관측기에 기초한 고장 감지 및 분리

다음의 n 차 선형 시불변 시스템과 고장 분리 필터라 불리는 관측기 시스템을 살펴보자.

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) + Ef(t), \quad x(t_0) = x_0 \\ y(t) &= Cx(t) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}(t) &= A\hat{x}(t) + Bu(t) + H(y(t) - C\hat{x}(t)) \\ r(t) &= R(y(t) - C\hat{x}(t)) \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, $x \in R^n$, $u \in R^m$, $y \in R^l$, $f \in R^r$ 들은 각각 상태, 제어입력, 센서출력, 그리고 고장벡터를 의미한다. 또한 $r(t) \in R^r$ 은 잔류오차 벡터이다. 이제 $\varepsilon = x - \hat{x}$ 을 상태 추정 오차라 두자. 그러면 잔류오차 $r(t)$ 는 $\varepsilon(t)$ 를 이용하여 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \dot{\varepsilon}(t) &= (A - HC)\varepsilon(t) + Ef(t), \quad \varepsilon(t_0) = x_0 - \hat{x}_0 \\ r(t) &= RC\varepsilon(t) \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, $\varepsilon(t_0)$ 는 상태추정의 초기 오차이며 미지수이다. (3)은 다음의 (4)와 같이 시간응답에 대한 식으로 다시 표현될 수 있다. 만일 $(A - HC)$ 의 고유치들이 음의 실수 부를 가진다면, 초기 추정오차의 영향은 시간 t 가 증가함에 따라 사라지게 됨에 주목하자.

$$\begin{aligned} r(t) &= RCe^{(A-HC)(t-t_0)}\varepsilon(t_0) + RC \int_{t_0}^t e^{(A-HC)(t-\tau)} E f(\tau) d\tau \\ &\simeq RC \int_{t_0}^t e^{(A-HC)(t-\tau)} E f(\tau) d\tau \end{aligned} \quad (4)$$

위 식에서 적절한 행렬 H 와 R 이 선정되면, 잔류오차의 i 번째 요소는 i 번째 고장에 의해서만 근사적으로 영향을 받게 된다. 이러한 r 개의 동시 고장을 분리하기 위해서는 $r(t)$ 가 다음과 같은 형태로 구성되어야 한다.

$$r(t) = \int_{t_0}^t \begin{bmatrix} e^{\lambda_1(t-\tau)} f_1(\tau) \\ e^{\lambda_2(t-\tau)} f_2(\tau) \\ \vdots \\ e^{\lambda_r(t-\tau)} f_r(\tau) \end{bmatrix} d\tau \quad (5)$$

여기서 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_r$ 은 관측기의 고유치이다.

III. 고장 분리를 위한 좌 고유구조지정

이미 참고문헌 [1]에서 출력 측정치가 고장의 개수보다 많을 때, (5)를 만족하는 행렬 H 와 R 의 설계법에 대하여 제안한 바 있다. 따라서, 다음의 3.1절에서는 논문

의 완성도를 높이기 위하여 앞서 제시된 방법을 정리, 보조정리와 증명의 형태로 간단히 살펴보고, 측정치 개수에 관한 조건을 완화시키는 보조 정리를 새로이 추가한다. 고장 분리 필터의 구체적인 설계과정은 3.2절에서 기술한다.

1. 고장 분리를 위한 좌 고유구조지정 조건

Φ 와 Ψ 를 각각 $(A - HC)$ 의 우, 좌 모드 행렬이라고 한다면, Φ 와 Ψ 는 다음 식을 만족한다.

$$\begin{aligned} (A - HC)\Phi &= \Phi\Lambda \\ \Psi^H(A - HC) &= \Lambda\Psi^H \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 Λ 는 대각요소가 원하는 고유치로 이루어진 대각행렬이며, 위첨자 H 는 공액복소전치행렬(complex conjugate transpose matrix)임을 나타낸다. 또한 A, Φ, Ψ 는 각각 $(n \times n)$ 차의 행렬이며, H 는 $(n \times l)$ 차, C 는 $(l \times n)$ 차의 행렬이다. Φ 와 Ψ 의 열 벡터들은 각각 $(A - HC)$ 의 우 고유벡터, 좌 고유벡터들이다. Φ 와 Ψ 가 서로 직교한다는 사실에 주목하자.

정리 1 : 만일 Φ 와 Ψ 가 각각 아래 관계를 만족시키는 우, 좌 모드 행렬이라면[7],

$$\Psi^H\Phi = I \quad (7)$$

잔류오차인 $r(t)$ 는 다음의 (8)과 같이 표현된다[8].

$$r(t) = RC\Phi \int_{t_0}^t e^{\Lambda(t-\tau)} \Psi^H E f(\tau) d\tau \quad (8)$$

만일 다음 식을 만족시키는 H 와 R 이 존재하면, $r(t)$ 는 (5)와 같이 표현될 수 있고, 이때 고장 분리가 이루어진다고 할 수 있다.

$$\begin{aligned} \Psi^H E &= \begin{bmatrix} -I_r & \dots \\ 0 & \dots \end{bmatrix}_{n \times r} \\ RC\Phi &= [I_r \mid \dots]_{r \times n} \end{aligned} \quad (9)$$

여기서 행렬 $RC\Phi$ 의 $[\dots]$ 는 임의의 값을 의미한다.

그러므로 좌 고유구조지정법을 이용한 고장 분리 필터 설계의 첫 단계는 Ψ 를 결정하는 것이다. 좌 모드 행렬 Ψ 는 다음의 두 조건을 반드시 만족해야 한다.

조건 1 : Ψ 는 반드시 도달 가능해야 한다. 이는 (6)을 만족시키는 필터 게인 H 가 존재해야 함을 의미한다.

조건 2 : Ψ 는 (9)를 만족해야 한다.

먼저 조건 1을 정리 2에서 살펴보자.

정리 2 : $\{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n\}$ 는 서로 다른 복소수의 공액복소 집합이다. 이때 다음과 같이 분할되는 행렬들을 정의하자.

$$\begin{aligned} S_{\lambda_i} &\equiv [\lambda_i I_n - A^T \mid C^T] \\ R_{\lambda_i} &\equiv \begin{bmatrix} N_{\lambda_i} \\ M_{\lambda_i} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (10)$$

여기서, 행렬 R_{λ_i} 의 열(column)들은 행렬 S_{λ_i} 의 영공간(null space)의 기저(basis)를 이루며, N_{λ_i} 는 $(n \times l)$ 차, M_{λ_i} 는 $(l \times l)$ 차이다. 이때 다음의 식을 만족하는, 실수

로 이루어진 $(n \times r)$ 차원의 이득행렬 H 가 존재하기 위한 필요충분조건은 다음과 같다.

$$\psi^H(A - HC) = \lambda_i \psi_i^H, \quad i = 1, 2, \dots, n$$

1) 좌 모드행렬 Ψ 의 역행렬이 존재한다. 이때 $\Psi = [\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_n]$ 이다.

2) 임의의 두 고유치가 $\lambda_i = \lambda_j^*$ 와 같이 공액복소 관계를 가지면, 이에 대응하는 고유벡터들도 $\psi_i = \psi_j^*$ 와 같은 공액복소 관계를 가져야 한다. 여기서, 위첨자 $(\cdot)^*$ 는 (\cdot) 의 공액복소수 또는 공액복소 벡터를 의미한다.

3) $\psi_i \in \text{span}(N_{\lambda_i})$.

증명 : 이 정리의 증명은 Andry 등[9]의 우 고유구조 지정법 증명에 정확하게 쌍대(duality)이다. ■

위의 정리를 통해 페루프 관측기의 좌 고유구조지정 은 좌 모드행렬 Ψ 가 N_{λ_i} 로부터 생성되는 열 공간에 속해야만 한다는 제약을 가지고 있음을 알 수 있다. 그러므로 원하는 조건을 만족하는 좌 고유구조지정을 위해서는 N_{λ_i} 로부터 생성되는 열 공간에서 적절한 벡터를 선택하거나, 고유벡터를 먼저 조건 1, 2에 맞도록 설정한 후 고유치를 종속적으로 구해야 한다.

주목 1 : 만일 $\{\lambda_i\}$ 가 서로 다른 복소수의 공액복소 집합이면, Ψ 의 역행렬이 존재한다. 그러면 정리 1로부터, 우 모드행렬 Φ 가 항상 존재하고, $\Phi = (\Psi^H)^{-1}$ 에 의해 계산된다는 것을 알 수 있다. 그러므로, 본 논문에서는 $\{\lambda_i\}$ 를 서로 다른 복소수의 공액복소 집합이라고 가정한다.

주목 2 : 정리 2를 이용하면, H 를 계산하지 않고도 Ψ 가 획득가능한지를 알 수 있다.

다음 보조정리에서 조건 2를 고려하자.

보조정리 1 : 먼저, E 의 새로운 영공간 행렬을 다음과 같은 형태로 선정하고, 이것을 N_E 라 표기하자.

$$N_E = \begin{bmatrix} \text{Null}(E_1^T) & \text{Null}(E_2^T) & \dots & \text{Null}(E_r^T) \\ \text{Null}(E^T)_1 & \dots & \text{Null}(E^T)_{(n-r)} \end{bmatrix}$$

여기서 E_i 는 i 번째 컬럼이 제외된 E 의 블록 행렬이다. 그리고 $\text{Null}(\cdot)$ 은 (\cdot) 의 영공간을 의미한다. 만일 0이 아닌 p_i 및 q_i 에 대하여 ψ_i 를 다음과 같이 선정하면 $\Psi^H E$ 는 (11)과 같이 구성된다.

$$\begin{aligned} \psi_i &= [\text{Null}(E_i^T)] \cdot q_i, \quad (i = 1, \dots, r) \\ \psi_i &= [\text{Null}(E^T)] \cdot q_i, \quad (i = r+1, \dots, n) \end{aligned}$$

$$\Psi^H E = \begin{bmatrix} \alpha_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \alpha_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \alpha_r \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

증명 : $(\Psi^H E)^T$ 를 고려해보자. Ψ 의 구성으로부터 직관적으로 (11)이 성립한다는 것을 알 수 있다. ■

이제 Ψ 의 조건 1, 2를 동시에 만족시킬 수 있는 지 고찰한다.

보조정리 2 : 만일 (12)가 성립하면, 조건 1과 2를 동시에 만족하는 Ψ 가 존재한다.(이때, \emptyset 은 공집합을 의미한다.)

$$\begin{aligned} \text{Null}([N_{\lambda_i} \mid -\text{Null}(E_i^T)]) &\neq \emptyset, \quad (i = 1, \dots, r) \\ \text{Null}([N_{\lambda_i} \mid -\text{Null}(E^T)]) &\neq \emptyset, \quad (i = r+1, \dots, n) \end{aligned} \quad (12)$$

증명 : 만일 다음의 식을 만족시키는 p_i 와 q_i 가 존재한다면 ψ_i 는 조건 1과 2를 동시에 만족시킨다.

$$\begin{aligned} \psi_i &= [N_{\lambda_i}] \cdot p_i = [\text{Null}(E_i^T)] \cdot q_i, \quad (i = 1, \dots, r) \\ \psi_i &= [N_{\lambda_i}] \cdot p_i = [\text{Null}(E^T)] \cdot q_i, \quad (i = r+1, \dots, n) \end{aligned} \quad (13)$$

(13)을 만족시키는 p_i 와 q_i 가 존재하기 위한 필요 충분 조건은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} p_i \\ - \\ q_i \end{bmatrix} &\in \text{Null}([N_{\lambda_i} \mid -\text{Null}(E_i^T)]), \quad (i = 1, \dots, r) \\ \begin{bmatrix} p_i \\ - \\ q_i \end{bmatrix} &\in \text{Null}([N_{\lambda_i} \mid -\text{Null}(E^T)]), \quad (i = r+1, \dots, n) \end{aligned} \quad (14)$$

그러므로 (12)는 (14)를 만족시키는 p_i 와 q_i 가 존재한다는 사실을 의미하며, 이것으로 조건 1, 2를 만족하는 Ψ 가 존재한다는 것을 알 수 있다. ■

만일 조건 1과 조건 2를 만족시키는 Ψ 가 존재하면, Φ 는 (7)에 의해 계산될 수 있다. λ_i 가 정리 2와 같이 선택되어 Ψ 의 역행렬이 존재한다면, $\Phi = (\Psi^H)^{-1}$ 에 의해 계산될 수 있다. 더욱이 $\text{rank}(C\Phi) = \text{rank}(C) = l$ 로부터 $l \geq r$ 이면 (9)를 항상 만족시키는 R 이 존재한다는 것을 알 수 있다.

정리 3 : 만일 $l \geq r+1$ 이면(이는 적어도 $r+1$ 개의 측정치가 존재한다는 의미이다) r 개의 동시 고장은 분리될 수 있다.

증명 : $l \geq r+1$ 인 경우 앞의 정리들로부터 (12)가 만족된다는 것을 충분히 알 수 있다. 다음 행렬의 차수를 생각해 보자.

$$\begin{aligned} \dim[N_{\lambda_i} \mid -\text{Null}(E_i^T)] &= n \times \alpha, \quad (i = 1, \dots, r) \\ \dim[N_{\lambda_i} \mid -\text{Null}(E^T)] &= n \times \beta, \quad (i = r+1, \dots, n). \end{aligned}$$

위 행렬들의 구성으로부터, α 와 β 는 다음 식과 같음을 알 수 있다.

$$\alpha \geq n - r + l + 1, \quad \beta \geq n - r + l$$

그런데 $\alpha > n$ 이고 $\beta > n$ 일 경우, (12)가 만족되므로 $l \geq r+1$ 이라는 가정으로부터 $\alpha > n, \beta > n$ 이 자연스럽게

성립함을 알 수 있다. ■

그러나 $l=r$ 인 경우에는 보조정리 2가 성립하지 않으므로, $l=r$ 일 때도 (9)를 만족시키는 Ψ 를 찾기 위해서는 다음의 보조 정리가 필요하다.

보조정리 3 : $l=r$ 인 경우, ϕ_i 를 다음과 같이 선정하면 페루프 고유벡터가 조건 2를 만족하도록 옮겨주는 H 를 구할 수 있다. 이때 $\{\lambda_i\}$, ($i=r+1, \dots, n$)는 시스템에 따라 종속적으로 결정된다.

$$\begin{aligned} \phi_i &= [N_{\lambda_i}] \cdot p_i = [\text{Null}(E_i^T)] \cdot q_i, \quad (i=1, \dots, r) \\ \phi_i &= [\text{Null}(E^T)] \cdot q_i, \quad (i=r+1, \dots, n) \end{aligned} \quad (15)$$

그리고, q_i 와 λ_i ($i=r+1, \dots, n$)는 각각 다음의 (16)에서 구해지는 행렬 T_{up} 의 고유벡터와 고유치로 결정된다.

$$\begin{bmatrix} T_{up} \\ \text{---} \\ T_{down} \end{bmatrix} = [\text{Null}(E^T) \mid C^T]^{-1} \cdot A^T \cdot \text{Null}(E^T) \quad (16)$$

증명 : i 가 $1, \dots, r$ 인 경우는 정리 3에서 $l=r$ 일지라도 고유구조 조건을 만족시킨다는 것을 알 수 있다. 그러므로 이후의 전개 과정에서는 i 가 $r+1, \dots, n$ 의 경우만 보이기로 한다. 먼저 $r = \text{rank}(C) = \text{rank}(E) = l$ 이라고 가정하고, 다음의 고유구조 구축식을 살펴보자.

$$(\lambda_i I - A^T + C^T H^T) \phi_i = 0 \quad (17)$$

고유치의 정확한 설정에 중점을 둔 Andry 등[9]의 방법과는 달리 고유벡터의 정확한 설정에 중점을 두고 고유구조 구축식을 정리하면 다음과 같다.

$$[\phi_i \mid C^T] \begin{Bmatrix} \lambda_i I \\ H^T \phi_i \end{Bmatrix} = A^T \phi_i \quad (18)$$

그러나 이 식은 n 개의 방정식에 $r+1$ 개의 미지수가 있는 형태로 정확한 해를 구할 수 없다. 그러므로 ϕ_i 를 단순히 하나의 벡터로 두지 않고, 다음과 같이 (9)를 만족시키는 $(n-r)$ 개의 벡터의 선형조합으로 두고 정리하면 다음 식을 얻는다.

$$\phi_i = \text{Null}(E^T) \cdot q_i$$

그러면 (18)은 다음과 같이 정리된다.

$$\begin{aligned} T_{pre} \cdot \begin{Bmatrix} \lambda_i I \cdot q_i \\ H^T \cdot \text{Null}(E^T) \cdot q_i \end{Bmatrix} &= A^T \cdot \text{Null}(E^T) \cdot q_i \\ T_{pre} &= [\text{Null}(E^T) \mid C^T] \end{aligned}$$

이때 $\text{rank}(C) = \text{rank}(E)$ 라는 가정으로부터 행렬 T_{pre} 는 $(n \times n)$ 의 정방 행렬임을 알 수 있다. 여기서, 행렬 T_{pre} 의 역행렬이 반드시 존재한다고 가정하자. 그러면, 위의 식은 (19)와 같이 정리되고,

$$\begin{Bmatrix} \lambda_i I \cdot q_i \\ H^T \cdot \text{Null}(E^T) \cdot q_i \end{Bmatrix} = T_{pre}^{-1} \cdot A^T \cdot \text{Null}(E^T) \cdot q_i \quad (19)$$

새로운 행렬 T_{up} 과 T_{down} 을 다음과 같이 정의하면,

$$\begin{bmatrix} T_{up} \\ \text{---} \\ T_{down} \end{bmatrix} = T_{pre}^{-1} \cdot A^T \cdot \text{Null}(E^T)$$

(19)는 다시 (20)으로 정리된다.

(이때 T_{up} 은 $(n-r) \times (n-r)$ 차의 정방행렬이다.)

$$\begin{Bmatrix} \lambda_i I \cdot q_i \\ H^T \cdot \text{Null}(E^T) \cdot q_i \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{up} \\ \text{---} \\ T_{down} \end{bmatrix} \cdot q_i \quad (20)$$

이 식에서 상위 블록만을 다시 정리하면, 다음과 같다.

$$\lambda_i I \cdot q_i = [T_{up}] \cdot q_i \quad (21)$$

그러면 (21)에서 알 수 있듯이, 선형조합 계수 q_i 와 고유치 λ_i 는 각각 행렬 T_{up} 의 고유벡터와 고유치로 결정된다. 일단 λ_i 가 선정되면 Andry 등[9]의 방법으로 행렬 H 를 구할 수 있고, 페루프 관측기 시스템의 좌 고유벡터 Ψ 는 고장 분리 조건을 만족시킨다. 그러므로 고유벡터에 의해 종속적으로 결정되는 $\{\lambda_i\}$, ($i=r+1, \dots, n$)가 안정하기만 하면 $l=r$ 인 경우에도 동시 고장은 분리되어 질 수 있다. ■

2. 고장 분리를 위한 좌 고유구조지정 알고리즘

앞에서 기술한 필터의 설계과정들을 정리하면 다음과 같은 알고리즘을 얻을 수 있다.

1단계 : 바람직한 고유값(λ_i)을 설정한다. 여기서 집합 $\{\lambda_i\}$ 는 서로 다른 복소수의 공액복소 집합이어야 한다. 이때 정수가 아닌 켈레복소수 고유치는 고장이 분리되어 나오는 모드를 피하여 배치해야 한다. 또한, 측정치와 동시 발생 고장의 숫자가 같을 경우 고장이 분리되어 나오는 상태의 고유치는 원하는 위치로 설정할 수 있지만, 그 외 상태들의 고유치는 아래 식의 정방행렬 T_{up} 의 고유치로 설정해야만 한다. 이때, T_{up} 의 고유치가 불안정한 시스템에 대하여는 고장 분리 필터 설계가 불가능하다.

$$\begin{bmatrix} T_{up} \\ \text{---} \\ T_{down} \end{bmatrix} = [\text{Null}(E^T) \mid C^T]^{-1} \cdot A^T \cdot \text{Null}(E^T)$$

2단계 : 선정된 고유치에 따라 다음과 같은 행렬들을 찾는다. 여기서 R_{λ_i} 의 열벡터들은 S_{λ_i} 의 영공간을 위한 기저를 구성한다.

$$S_{\lambda_i} \equiv [\lambda_i I_n - A^T \mid C^T], \quad R_{\lambda_i} \equiv \begin{bmatrix} N_{\lambda_i} \\ \text{---} \\ M_{\lambda_i} \end{bmatrix}$$

3단계 : 고장 행렬 E 를 가지고 다음과 같은 행렬을 구성한다.

$$N_E = [\text{Null}(E_1^T) \quad \text{Null}(E_2^T) \quad \dots \quad \text{Null}(E_r^T) \mid \text{Null}(E^T)_1 \quad \dots \quad \text{Null}(E^T)_{(n-r)}]$$

여기서 r 은 최대 동시 고장의 숫자를 의미하며, E_i ($i=1, \dots, r$)는 i 번째 열이 제외된 E 의 블록 행렬이다.

4단계 : 각 N_{λ_i} 들을 가지고 다음과 같은 Ψ_{avg} 를 구성한다.

$$\Psi_{avg} = [N_{\lambda_1}, N_{\lambda_2}, \dots, N_{\lambda_r}, \dots, N_{\lambda_n}]$$

5단계 : (14)를 만족시키는 매개변수 벡터 p_i 와 a_i 를 결정한다.

6단계 : $\Psi^H E$ 대각 요소들의 정규화를 위해서 새로운 매개변수 벡터 p_i^N 를 선정한다.

$$p_i^N = \frac{1}{\|E^T \cdot N_{\lambda_i} \cdot p_i\|_2} p_i, \quad (i=1, \dots, r)$$

$$p_i^N = p_i, \quad (i=r+1, \dots, n)$$

7단계 : 좌 고유벡터 Ψ 를 앞에서 설정된 p_i^N 를 가지고 다음과 같이 구성한다.

$$\psi_i = N_{\lambda_i} p_i^N, \quad \Psi = [\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_n]$$

8단계 : 행렬 W 를 다음과 같이 구성한다.

$$w_i = M_{\lambda_i} p_i^N, \quad W = [w_1, w_2, \dots, w_n]$$

9단계 : 앞 단계에서 계산한 Ψ 와 W 를 이용하여 이득행렬 H 를 다음과 같이 계산한다.

$$H^T = W(\Psi)^{-1}$$

10단계 : $C\Phi$ 를 구성한다. 여기서 Φ 는 $\Phi = (\Psi^H)^{-1}$ 의 식을 통해서 계산된다.

11단계 : (9)의 조건을 만족시킬 수 있는 잔차출력 행렬 R 을 계산한다. 이 행렬은 C 와 E 의 랭크조건에 따라, $C\Phi$ 의 적절한 부분행렬을 취해서 역을 취하면 구해질 수 있다.

IV. 견실 고장 감지 및 분리

본 장에서는 시스템 파라미터의 변동이 있는 경우에도 고장 분리를 할 수 있는 견실 고장 분리 필터 설계법에 대하여 기술한다. 먼저 4.1절에서는 시스템 파라미터 변동을 외란 형식으로 변환하는 과정에 대하여 기술하고, 4.2절에서는 바뀌어진 외란 벡터가 고장 분리에 영향을 미치지 못하게 하는 고유구조지정 조건에 대하여 제시한다.

1. 시스템 모델링 상의 불확실성[2]

실제 시스템 모델이 확실하게 알려지는 경우가 드물다는 것은 잘 알려진 사실이다. 또한 시스템의 파라미터들은 시스템 요소의 노후나, 각종 이유들로 인하여 시간에 따라 바뀔 수도 있다. 이러한 시스템 모델링의 불확실성(uncertainty)을 참고문헌 [2]에 제시된 모델링 방법을 통해 외란의 형태로 변형한다. 본 장에서, 우리는 행렬 A, B 가 공칭값은 알 수 있으나 불확실요소(uncertain parameter)들이 있는 행렬로 가정한다. Saif와 Guan[2]에 의하면, 이러한 불확실 시스템의 동역학적 모델링은 미

지입력에 의해 구동되는 기지 시스템(known system)으로 표현되어 질 수 있다. 이러한 모델링을 위하여 다음의 정의가 필요하다.

정의 : 어떤 $(n \times m)$ 행렬의 $(n \times k)$ 차 불확실성 지시 행렬은 $I_A(a_1, a_2, \dots, a_k)$ 와 같이 지정된다. 여기서 k 는 불확실요소가 있는 행의 숫자이다. 이 행렬의 j 번째 열은 1의 값을 가지는 a_j 번째 요소를 제외하고는 모두 0으로 구성되어 있다[2].

예를 들어, 만일 A 가 4×4 행렬이고 2행과 3행에 불확실성이 있다면 $k=2$ 이고, $a_1=2, a_2=3$ 이다. 덧붙여, 앞으로의 전개에서 A 는 다음과 같이 가정한다.

$$A = A_0 + \Delta A \tag{22}$$

여기서, A_0 는 공칭값이고, 단지 k 행에 불확실성이 있다고 하자. 그러면 A 와 관련된 불확실 행렬 ΔA 는 다음과 같이 쓰여질 수 있다.

$$\Delta A = I_A(a_1, a_2, \dots, a_k) \begin{pmatrix} \Delta A_{a_1} \\ \Delta A_{a_2} \\ \vdots \\ \Delta A_{a_k} \end{pmatrix}$$

여기서, ΔA_{a_i} 는 행렬 ΔA 의 a_i 번째 열이다. 이러한 표기법을 다음과 같이 단순화시킨다.

$$\Delta A = I_A \Delta A_a \tag{23}$$

유사한 정의가 행렬 B 에도 적용될 수 있다. 그러면 시스템의 불확실성은 다음과 같이 표시될 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= A_0 x(t) + B_0 u(t) + I_A \Delta A_a x(t) + I_B \Delta B_b u(t) \\ y(t) &= Cx(t) \end{aligned}$$

위의 식을 정리하면 아래와 같이 모든 불확실성을 $Dv(t)$ 의 형태로 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= A_0 x(t) + B_0 u(t) + Dv(t) \\ y(t) &= Cx(t) \end{aligned} \tag{24}$$

여기서 D 와 $v(t)$ 는 각각 다음과 같다.

$$D = [I_A \ I_B]$$

$$v(t) = \begin{pmatrix} \Delta A_a x(t) \\ \Delta B_b u(t) \end{pmatrix} \tag{25}$$

2. 불확실성 모델에 근거한 견실 고장 감지 및 분리설계
 서론에서 이미 잔류오차 분석 기법의 견실성이 얼마나 중요한가에 대해서는 잠시 언급하였다. 본 장에 제시되는 견실 고장 감지 및 분리는 외란의 형태로 바뀌어진 시스템 파라미터 변동에 대하여 견실한 고장 분리 결과가 유지되도록 고유구조를 설정하는 방법을 사용하였다. 먼저, $\text{rank}(C) = n$ 라고 가정하고 견실한 고장 분리 필터 설계를 위해서 (24)에 다음과 같이 고장입력을 추가한다.

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= A_0 x(t) + B_0 u(t) + Dv(t) + Ef(t) \\ y(t) &= Cx(t) \end{aligned}$$

이 식을 (8)과 같이 정리하면 다음과 같다.

$$r(t) = RC\Phi \int_0^t e^{A(t-\tau)} \Psi^H \{Dv(\tau) + E f(\tau)\} d\tau \quad (26)$$

그러면, (26)으로부터 다음의 정리를 유도할 수 있다.

정리 4 : 만일 다음 식을 만족시키는 H 와 R 이 존재하면, $r(t)$ 는 (5)와 같이 표현될 수 있다.

$$\Psi^H E = \begin{bmatrix} I_r \\ \vdots \end{bmatrix}_{n \times r} \quad \Psi^H D = \begin{bmatrix} 0_r \\ \vdots \end{bmatrix}_{n \times r} \quad (27)$$

$$RC\Phi = [I_r \quad | \quad 0_{r \times (n-r)}]$$

$\text{rank}(C) = n$ 일 때 페루프 관측기 시스템의 ψ_i 는 각자 독립이지만 하면 원하는 방향으로 자유롭게 움직일 수 있다. 그러므로 (27)을 만족시키고, ψ_i 가 각자 독립인 Ψ 를 찾는 것이 중요하다.

일단 Ψ 가 선정되면 $\text{rank}(C\Phi) = \text{rank}(C) = n$ 로부터 (27)을 항상 만족시키는 R 이 존재한다. (27)을 만족시키는 Ψ 의 선정을 위하여 다음의 보조정리를 살펴보자.

보조정리 4 : 만일 (28)이 성립하면 (27)을 만족시키는 Ψ 가 존재한다.

$$\text{Null}([\text{Null}(D^T) \mid -\text{Null}(E_i^T)]) \neq \emptyset, \quad (i=1, \dots, r) \quad (28)$$

증명 : 만일 다음의 식을 만족시키는 p_i 와 q_i 가 존재한다면 Ψ 는 (27)을 만족시킨다.

$$\psi_i = [\text{Null}(D^T)] \cdot p_i = [\text{Null}(E_i^T)] \cdot q_i, \quad (i=1, \dots, r) \quad (29)$$

위 식을 만족시키는 p_i 와 q_i 가 존재하기 위한 필요충분 조건은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} p_i \\ \vdots \\ q_i \end{bmatrix} \in \text{Null}([\text{Null}(D^T) \mid -\text{Null}(E_i^T)]), \quad (30)$$

($i=1, \dots, r$)

그러므로, (28)은 (30)을 만족시키는 p_i 와 q_i 가 존재한다는 사실을 의미한다.

정리 5 : $\text{rank}(D^T) \leq (n-r)$ 이면, (26)의 출력 $r(t)$ 에서 $v(t)$ 항의 영향을 배제할 수 있다.

증명 : 다음 행렬의 차수를 생각해 보자.

$$\dim [\text{Null}(D^T) \mid -\text{Null}(E_i^T)] = n \times \gamma, \quad (i=1, \dots, r)$$

여기서 $w = \dim [\text{Null}(D^T)]$ 라 두면 위 행렬의 구성으로부터 γ 는 다음 식과 같음을 알 수 있다.

$$\gamma \geq n - r + w + 1$$

$\gamma \geq n$ 일 경우만 (22)가 만족되므로 $w \geq r$ 일 경우에 성립함을 알 수 있다. $w \geq r$ 일 조건은 $\text{rank}(D^T) \leq (n-r)$ 이므로 결국 정리 5가 성립함을 알 수 있다. ■

V. 수치예제 및 비행체 시스템에의 응용

본 논문에서 고장 분리 필터 설계 방법 중 개선된 부분을 수치예제 및 VTOL 비행체 시스템에 적용하여 그

타당성 및 유용성을 검증한다.

1. 수치 예제

좌 고유구조지정법을 이용한 필터 설계법을 검증하기 위해서 Liu와 Si가 제시한 예제[4]에 대하여 제안된 방법으로 필터를 설계하였다. Liu와 Si가 제시한 예제는 다음과 같다.

$$A = \begin{bmatrix} -0.2 & 0.1 & 0 \\ 0.25 & -0.3 & 0 \\ -0.1 & 0.4 & -0.5 \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, E = \begin{bmatrix} 1 & 2 \\ 2 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$$

먼저 개루프 시스템의 고유치들은 다음과 같다.

$$A^{open} = \{ \lambda_1^o, \lambda_2^o, \lambda_3^o \} = \{ -0.5000, -0.4158, -0.0842 \}$$

이 시스템에서는 동시 고장의 숫자와 측정치의 숫자와 같으므로, 고장의 숫자만큼 원하는 고유치를 이동할 수 있다. 이제 관측기의 이동 가능한 고유치를 다음과 같이 선정하자.

$$A^d = \{ \lambda_1^d, \lambda_2^d \} = \{ -1.0 \quad -2.0 \}$$

그러면, 3장에서 기술한 방법에 의해서 T_{up} 은 다음과 같이 계산되고, 관측기의 지정 불가능한 고유치는 T_{up} 의 고유치로 정해진다.

$$\begin{bmatrix} T_{up} \\ \vdots \\ T_{down} \end{bmatrix} = [\text{Null}(E^T) \mid C^T]^{-1} \cdot A^T \cdot \text{Null}(E^T)$$

$$= \begin{bmatrix} -0.5000 \\ \vdots \\ 0.2728 \\ -0.5346 \end{bmatrix}$$

$$A^a = \{ \lambda_3^a \} = \{ -0.5 \}$$

이제 고장 분리를 가능하게 하는 Ψ 를 구할 수 있고, 원하는 Ψ 로 지정하는 이득행렬 H 와 잔차행렬 R 은 다음과 같이 계산된다.

$$H = \begin{bmatrix} 1.8 & -2.2 \\ 0.25 & 0.45 \\ 0.65 & -0.375 \end{bmatrix}, R = \begin{bmatrix} 0 & 0.5 \\ 0.5 & -0.75 \end{bmatrix}$$

결과는 Liu와 Si의 설계법으로 구한 이득행렬 값과 동일하다. 이 경우 시스템의 전 상태를 측정할 수 없고, 관측불가능 함에도 고장이 분리된다는 점에 유의하자. 그러나 다음과 같이 C 행렬이 변형되었을 때, 동일한 목적의 필터를 Liu와 Si의 필터 설계방법으로 구해보자.

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & -1 \end{bmatrix}$$

Liu와 Si의 필터는 C 의 랭크가 증가하여 관측이 가능하게 되었음에도 불구하고 여전히 두 개의 고유치밖에 지정할 수 없다. 이 지정 가능한 고유치를 $-1, -2$ 로 두어 설계한 후 필터의 고유치를 모두 구해보면, $\lambda_1 = -1, \lambda_2 = -2, \lambda_3 = 0.0733$ 등의 값을 가지게 설계되어, 결국 필터 시스템은 발산하는 것을 알 수 있다. 반면에 좌 고

유구조지정법을 이용하면, 3개의 고유치를 모두 지정할 수 있고 고유치가 정확하게 이동하는 것을 알 수 있게 된다. 다음은 주어진 C 에 대해 좌 고유구조지정법을 이용하여 설계한 이득행렬 H 와 R 이다. 이때 원하는 고유치는 $-1, -2, -3$ 으로 두고 설계하였다.

$$H = \begin{bmatrix} -2.9495 & 9.6738 & 0.1748 \\ -9.6946 & 25.3115 & 5.4223 \\ -5.4609 & 14.9023 & 2.6805 \end{bmatrix}$$

$$R = \begin{bmatrix} 2.4861 & -5.7154 & -0.7431 \\ 0.3886 & -0.4715 & -0.6943 \end{bmatrix}$$

$(A-HC)$ 의 고유치를 구해보면 $\lambda_1 = -1, \lambda_2 = -2, \lambda_3 = -3$ 으로 정확하게 원하는 곳으로 가는 것을 알 수 있다. 이 결과로 Liu와 Si의 필터가 C 에 여분의 자유도가 존재함에도 불구하고 이것을 활용하지 못한다는 것을 분명히 알 수 있다.

2. VTOL기에 대한 견실 고장 분리 필터 설계

본 절에서는 선형화된 VTOL기 동역학식에 대한 견실 고장 감지 및 분리를 수행한다. 사용된 동역학 식은 참고문헌 [2]의 예제를 참조하였으며 시스템 출력행렬 C 가 풀랭크를 가지므로 앞의 단락에서 제시한 견실 고장 분리 필터가 설계 가능하다. 먼저 주어진 모델에는 A 행렬의 3행과 B 행렬의 2행에 시스템 파라미터에 변동이 있다고 가정한 후 이 파라미터 변동에 대하여 견실한 고장 분리 필터를 설계한다.

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + Ef(t)$$

$$y(t) = Cx(t)$$

$$A_0 = \begin{bmatrix} -9.9477 & -0.7476 & 0.2632 & 5.0337 \\ 52.1659 & 2.7452 & 5.5532 & -24.4221 \\ 26.0922 & 2.6361 & -4.1975 & -19.2774 \\ 0.0 & 0.0 & 1.0 & 0.0 \end{bmatrix}$$

$$B_0 = \begin{bmatrix} 0.4422 & 0.1761 \\ 3.5446 & -7.5922 \\ -5.52 & 4.49 \\ 0.0 & 0.0 \end{bmatrix}$$

$$\Delta A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.5 & 0 & 2.0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \Delta B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 2.0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad E = \begin{bmatrix} 1 & 2 \\ 2 & 0 \\ 1 & 1 \\ 3 & 1 \end{bmatrix}$$

이 시스템 모델은 4.1절에 근거하여 다음과 같은 형태로 바뀔 수 있다.

$$\dot{x}(t) = A_0x(t) + B_0u(t) + Dv(t) + Ef(t)$$

$$y(t) = Cx(t)$$

$$D = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad v(t) = \begin{bmatrix} [0 & 0.5 & 0 & 2]x(t) \\ [2 & 0]u(t) \end{bmatrix}$$

(27)에 제시된 고유구조 조건을 만족하는 Ψ 의 값과 이득행렬 H 와 R 은 다음과 같다.

$$\Psi = \begin{bmatrix} 0.2000 & -1.2000 & -0.0811 & -0.0827 \\ 0 & 0 & -0.0830 & -0.0839 \\ 0 & 0 & 0.1197 & 0.1228 \\ -0.4000 & 0.4000 & 0.0425 & 0.0426 \end{bmatrix}$$

$$H = \begin{bmatrix} 7.7470 & 5.3813 & 4.3705 & -4.6337 \\ 15.3209 & 72.7313 & -97.7937 & -9.1555 \\ 21.4666 & 49.9593 & -64.6042 & -4.5193 \\ -0.6000 & 0.8000 & -0.2000 & -0.8000 \end{bmatrix}$$

$$R^T = \begin{bmatrix} -0.2000 & 1.2000 \\ -0.4000 & 0.4000 \\ -0.4000 & 0.4000 \\ 0.4000 & -0.4000 \end{bmatrix}$$

경우 1 : 다음의 식들과 같은 고장이 동시에 발생
 $f_1 = 5.0 (t \geq 5s), f_2 = 3.0 (t \geq 10s)$

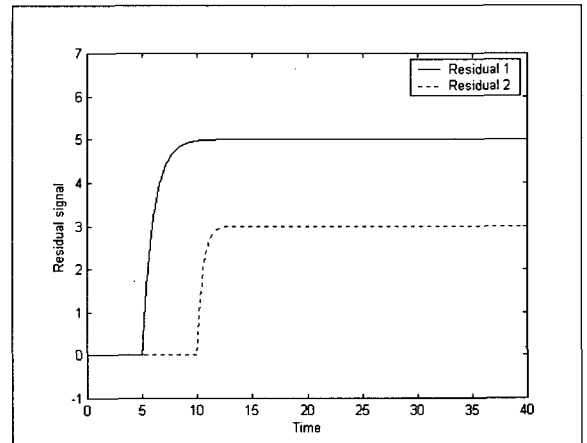


그림 1. 견실 고장 분리 적용 시 잔류오차(파라미터 변동이 있을 때).

Fig. 1. The residual on which robust FDI method is applied(when the parameter uncertainty exists).

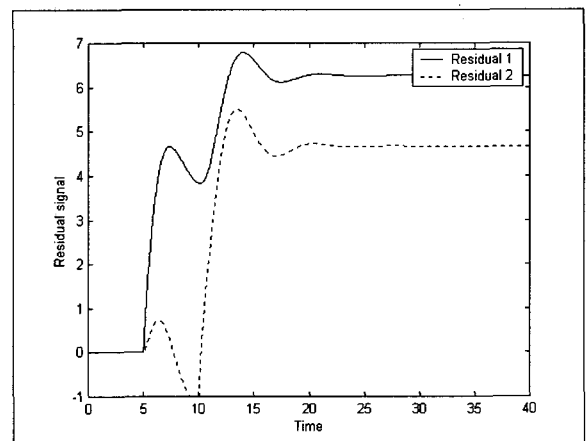


그림 2. 일반 고장 분리 적용 시 잔류오차(파라미터 변동이 있을 때).

Fig. 2. The residual on which robust FDI method is applied(when the parameter uncertainty exists).

경우 2 : 다음의 식들과 같은 고장이 동시에 발생
 $f_1 = 3\sin(t) \ (t \geq 0s), \ f_2 = t \ (t \geq 10s)$

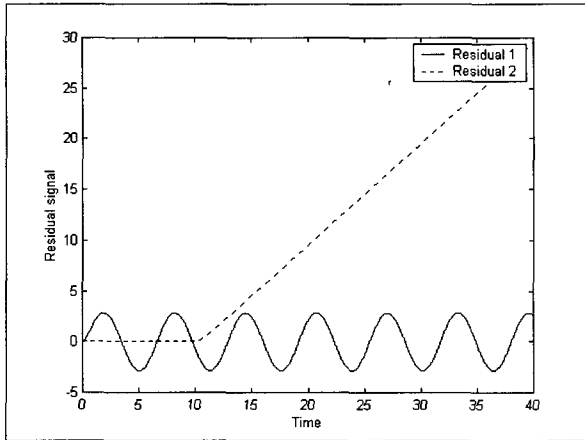


그림 3. 견실 고장 분리 적용 시 잔류오차(파라미터 변동이 없을 때).

Fig. 3. The residual on which robust FDI method is applied(when no parameter uncertainty exists).

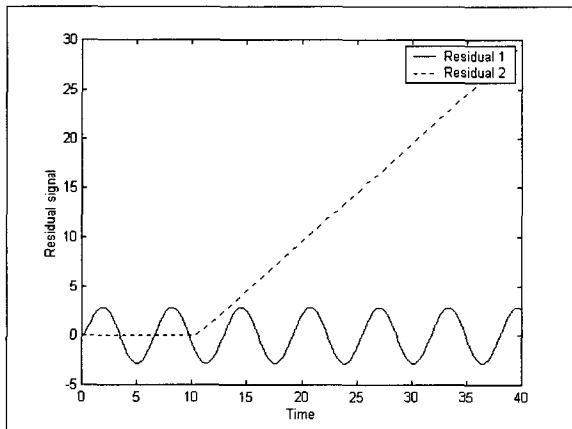


그림 4. 일반 고장 분리 적용 시 잔류오차(파라미터 변동이 없을 때).

Fig. 4. The residual on which FDI method is applied(when no parameter uncertainty exists).

이번에는 H 와 R 을 구한 후, Matlab/Simulink로 시스템을 구성하여 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션은 다음의 두 가지 경우로 고장이 시스템에 발생하였다고 가정하였다. 이때 각각의 시뮬레이션 결과를 그림 1, 2, 3 및 4에 도시하였다. 시뮬레이션은 견실 고장 분리 필터 설계법으로 구한 똑같은 이득행렬 H 와 R 을 가지고 파라미터 변동이 있을 때(그림 1)와 없을 때(그림 3)를, 일반 고장 분리 필터 설계법[1]으로 설계한 H 와 R 로 변동이 있을 때(그림 2)와 없을 때(그림 4)를 각각 수행하였다. 파라미터 변동이 없을 경우, 2가지 설계법 모두 고장 분리 필터가 잘 작동하고 있음을 알 수 있으나, 파

라미터 변동이 있을 경우는 견실성을 고려한 설계법만이 고장 분리를 잘 하고 있음을 알 수 있다. 그러므로 설계자는 A 와 B 행렬의 어느 행에 주된 파라미터 변동이 발생하는지를 파악하면 파라미터 변동에 견실한 고장 분리 필터를 설계할 수 있으며, 그림에서 알 수 있듯이 필터의 출력이 다른 시스템 상태에 영향을 받지 않고 고장 입력을 잘 추종하게 할 수 있다. Liu와 Si의 설계방식을 주어진 예제 시스템에 적용하면 지정할 수 없는 고유치가 불안정하므로 발산하게 된다. 그러므로 제시된 예제 시스템에 대하여는 필터를 설계할 수 없는 이유로 각 경우에 견실성이 고려되지 않은 좌 고유구조지정법 필터 설계법과 출력 결과를 비교하였다. 이 그림들로 서론에서 언급한 것과 같이 잔류오차 분석 기법은 시스템 파라미터 변동에 약하다는 것을 또한 알 수 있다. 결과적으로 실제 설계과정에서는 파라미터 변동의 발생 위치만 고려되면 파라미터 변동량에 관계없이 필터를 설계할 수 있다. 예제의 VTOL기를 살펴보면, A 의 3행, B 행렬의 2행 요소에 변동이 있다는 것을 파악했으므로 ΔA 나 ΔB 의 값에 상관없이 필터를 설계할 수 있다.

VI. 결론

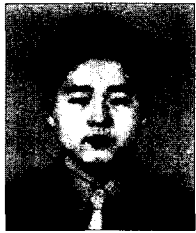
본 논문에서는 좌 고유구조지정법을 이용한 견실 고장 분리 필터의 설계 방법을 제안하였다. 이 필터를 사용하기 위해서는 r 개의 동시 고장이 있을 경우 최소 r 개의 출력 측정치가 필요하며, 출력 측정치의 여분을 효율적으로 사용할 수 있다. $\text{rank}(C)=r$ 인 경우 좌 고유구조지정법으로 설계된 필터는 Liu와 Si의 방식으로 설계된 필터와 동일한 H 와 R 을 가진다. 그러나 $\text{rank}(C) > r$ 인 경우에는 모든 고유치들(n 개)을 정확하게 원하는 위치에 지정할 수 있어, 같은 경우에 Liu와 Si의 필터에 생길 수 있는 불안정한 고유치의 발생을 막을 수 있다. 또한, $\text{rank}(C)=n$ 인 경우에는 시스템 파라미터 변동에 견실한 고장 분리 필터를 설계할 수 있다.

본 논문에서 제안되는 방법은 시스템의 모드 분석에 착안하여 1차적으로 좌 모드 행렬 Ψ 를 지정하여 고장 입력들이 서로 분리되도록 하였고, 다시 잔류오차 행렬 R 을 지정하여 우 모드행렬 Φ 와 출력 행렬 C 를 거치는 동안 뒤섞여질 고장 입력을 2차적으로 분리하도록 하였다. 또한 본 논문에서는 고장 분리가 성립되기 위해 요구되는 조건들을 제시하고 이 조건들을 만족시키는 고유구조지정법을 새로이 제안하였다. 마지막으로, 수치예제와 VTOL기 시스템에 대하여 필터를 설계하여 그 성능과 유용성을 확인하였다.

참고문헌

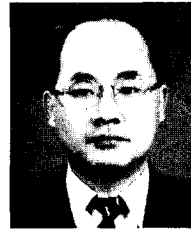
[1] 최재원, 이대영, "좌 고유구조지정 기법을 이용한 고장 분리 필터 설계," 제어·자동화·시스템공학 논문지, 제4권, 제6호, pp. 695-702, 12, 1998.
 [2] M. Saif and Y. Guan, "A new approach to robust fault detection and identification," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic*

- Systems*, vol. 29, no. 3, pp. 685-693, 1993.
- [3] J. W. Choi, "Comment on "A new approach to robust fault detection and identification," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 32, no. 3, pp. 1137-1138, July, 1996.
- [4] B. Liu and J. Si, "Fault isolation filter design for linear time-invariant systems," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 42, no. 5, pp. 704-707, 1997.
- [5] J. W. Choi, J. G. Lee, Y. Kim, and T. Kang, "Design of an effective controller via disturbance accommodating left eigenstructure assignment," *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, vol. 18, no. 2, pp. 347-354, 1995.
- [6] D. S. Hwang, S. K. Chang, and P. L. Hsu, "A practical design for a robust fault detection and isolation system," *International Journal of Systems Science*, vol. 28, no. 3, pp. 265-275, 1997.
- [7] C. T. Chen, *Linear System Theory and Design*, New York, Holt, Rinehart and Winston, 1984.
- [8] J. L. Junkins and Y. Kim, *Introduction to dynamics and control of flexible structures*, AIAA Education Series, Washington D.C., American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 1993.
- [9] A. N. Andry, E. Y. Shapiro, and J. C. Chung, "Eigenstructure assignment for linear systems," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 19, no. 5, pp. 711-729, 1983.



이 대 영

1997년 부산대 제어기계공학과 졸업.
 동대학원 석사(2001). 2001년~현재
 (주)현대중공업 기전연구소 시스템제
 어연구실 연구원. 관심분야는 고장
 감지 및 분리, Fault tolerable control.



최 재 원

1987년 서울대 제어계측공학과 졸업.
 동대학원 석사(1989). 동대학원 박사
 (1995). 1995.2~1995.3 일본 NA-
 SDA/TKSC 방문연구원. 1995.9~
 1996.3 미국 USC 방문연구원. 1998.
 1~1998.2 미국 LSU 방문연구원.
 IFAC 항공 우주 및 신경시스템 기술분과위원. 1996년~
 현재 부산대학교 기계공학부 조교수. 관심분야는 견실
 고유구조 지정이론, 선형 시변 시스템 이론, 항법 및 유
 도 제어 시스템, 자동차 현가장치 제어, 센서 융합 이론.