

좌 고유구조 지정기법을 이용한 고장분리 필터 설계

Fault Isolation Filter Design Using Left Eigenstructure Assignment Scheme

최재원, 이대영
(Jae Weon Choi and Dae Young Lee)

Abstract : In this paper, we propose a novel fault isolation filter design method using the left eigenstructure assignment scheme proposed by Choi *et. al.*. The proposed filter shows good fault isolation performance with exact eigenstructure assignment. An eigenstructure assignment methodology which satisfies the required fault isolation conditions is also proposed. The proposed method guarantees that the corrupted m simultaneous faults can be isolated when the number of available output measurements are $(m+1)$.

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

I. 서론

최근 항공, 화학, 자동차 등의 산업에서 모델에 근거한 고장 감지 및 분리이론에 대한 관심이 점차 증대되고 있다[1]. 이러한 시스템에서 발생하는 고장 현상은 막대한 경제적 피해와 치명적인 인명 피해를 발생시킬 수 있기 때문에 고장현상을 방지하는 것은 대단히 중요하다 할 수 있다. 이러한 이유로 고장현상에 대한 연구가 다양하게 많이 이루어지고 있고, 이에 따라 고장 감지와 분리 및 산업현장에서의 응용에 대한 관심도 점차 증가하고 있다.

초창기의 고장 감지 및 분리는 하드웨어 중복(즉, 다중센서)에 의하여 단순하게 이루어졌다. 예를 들어, 각 측정 부분에 요구되는 센서를 3중, 4중으로 부착하게 되면 다중 센서의 출력들은 직접적으로 비교될 수 있게 되고, 그 중 심각하게 이탈하는 출력이 발생하는 센서는 고장난 것으로 선언할 수 있다[2]. 그러나 근래 들어 이러한 고장 감지 및 분리기법의 주된 연구 관심분야는 대규모의 하드웨어 중복보다는 잔류오차 분석 쪽으로 옮겨지고 있는 추세이다[1]. 왜냐하면 우주 구조물 제어 등의 시스템에서 고장 감지 및 분리를 수행하고자 할 때, 구조물의 진동측정을 위해서 약 100개의 센서가 위해서 필요하다 가정하면, 단지 하드웨어 중복에 의한 고장 감지 및 분리를 수행하기 위해 각각의 센서를 세개 또는 네개씩 중복해서 부착하는 것은 대단히 비효율적임을 알 수 있다[2].

이에 비해 잔류오차 분석 기법은 구동기의 제어입력과 센서의 출력을 시스템의 동역학 모델식과 연결하여 실제 상태 출력과 모델식에서 구성된 상태를 일치시키는 방법을 사용한다. 이러한 고장 감지 및 분리 방법의 한 가지 바람직하지 못한 결과는 동적 시스템의 모델링 오차, 또는 파라미터 변동 등과 같은 요소들이 고장의 감지 및 분리 결과에 혼동을 줄 수 있다는 점이다[3][4]. 이러한 잔류오차 분석 방법을 이용하는 고장 감지 및 분

리는 여러 방면에서 연구되었다. Willsky[5]는 시스템 모델에 대해서 몇 가지 고장 진단 방법들을 제시했고, Isermann[6]과 Frank[7]는 해석적 중복을 이용한 검출 방법들에 대해서 정리했고, 크게 parity space method, parameter identification method, observer method 등의 세가지 방법으로 분류했다. 이중 observer method에 속하는 방법이 바로 미지 입력 관측기(unknown input observer)[3][4] 개념이다. 이 방법은 구동기 고장을 시스템의 미지입력으로 간단히 모델링할 수 있기 때문에 고장 감지 및 분리에 효과적으로 사용될 수 있다.

미지 입력 관측기 개념 하에서 고장 분리 결과는 몇 가지 조건하에서만 얻어질 수 있다. 즉, 시스템이 관측 가능해야 하고, 각 고유치들은 서로 다른 값들로 할당되어야 하는 등의 조건이 필요하다. 그러나, 어떤 경우에서든 다중 고장 발생에 대해서는 겹겹의 필터가 제공되어야 한다[8]. 예를 들어, 참고문헌 [9]와 [10]에 제시된 방법들은 고유구조 지정방법을 사용하여 분석 관측기를 설계하고 있으나 이러한 방법에서도 역시 다중의 고장을 분리해 내기 위해서는 중복된 필터를 필요로 한다. Liu와 Si[8]는 이러한 단점에 착안한 새로운 필터 설계 방법을 제안하였는데, 제안된 필터 설계 방법은 근사적으로 동시 다발적인 고장을 하나의 전상태(full state) 관측기를 통하여 분리하는데 목적이 있다. 이 고장 분리 필터 설계 방법은 정상상태 피드백 불연성화 방법을 이용하는데 이러한 방법으로 사용자는 만일 m 개의 출력 측정치만 있으면, m 개의 동시다발적인 고장을 구별할 수 있으며, m 개의 고유치를 원하는 곳으로 지정할 수 있다. 그러나 이 필터는 $(n-m)$ 개의 지정할 수 없는 고유치를 가지게 되고, 더욱이 근사적인 고장분리의 결과는 이 지정할 수 없는 고유치가 불안정할 때에는 얻어질 수 없다는 치명적인 단점을 가지고 있어서 제한된 일부 시스템에만 적용할 수 있는 한계를 가지고 있다.

본 논문에서는 좌 고유구조 지정 개념[11-13]을 관측기 설계에 도입한 새로운 고장분리 필터 설계법을 제안한다. 제안되는 필터는 우수한 고장분리 성능을 보여 주

접수일자 : 1998. 3. 26., 수정완료 : 1998. 8. 10.

최재원 : 부산대학교 기계공학부 및 기계기술연구소

이대영 : 부산대학교 기계공학부

며, Liu와 Si의 필터와 비교해 보았을 때 다음과 같은 이점을 가지고 있다.

- 고장입력의 개수 (m 개) 만큼만 고유치를 지정할 수 있는 Liu와 Si의 필터에 비해 본 논문에서 설계된 필터는 모든 고유치들 (n 개)을 정확하게 원하는 위치에 지정할 수 있다. 단, 이때 추정치는 고장입력의 개수보다 적어도 1개는 더 많아야 한다. 이러한 이유로 인하여 Liu와 Si의 방법을 이용한 필터 설계를 위해서 요구되는 조건들 즉, ($n-m$)개의 지정할 수 없는 고유치가 안정해야 한다는 조건이 본 논문에서 제안하는 필터 설계과정에서는 더 이상 필요없게 된다.

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 다시 뒤섞여질 고장입력을 2차적으로 분리하도록 하였다. 또한 본 논문에서는 고장분리가 성립되기 위해 요구되는 조건들을 제시하고, 이 조건들을 만족시키는 고유구조 지정법을 새로이 제안한다. 결과적으로 본 논문에서 제안되는 고장분리 필터의 설계 방법은 시스템이 관측가능하고, ($m+1$)개의 추정치만 있으면, 필터의 고유치를 정확히 원하는 곳에 지정하면서 m 개의 동시 다발적인 고장을 분리할 수 있다.

II. 관측기에 기초한 고장 감지 및 분리

다음의 n 차 선형 시불변 시스템을 고려하자.

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + Ef(t), \quad x(t_0) = x_0 \quad (1)$$

$$y = Cx(t) \quad (2)$$

여기서, $x \in R^n$, $u \in R^m$, $y \in R^l$, $f \in R^m$ 들은 각각 상태, 제어입력, 센서 출력, 그리고 고장 벡터를 의미한다. A , B , C 는 적절한 차원의 상수 행렬들이다. 풀랭크(full rank)의 ($n \times m$) 행렬 E 는 고장행렬로 고려할 수 있고, f 는 시간에 따른 동작이 전혀 알려지지 않은 함수들의 벡터이다. 이 $f(t)$ 는 시스템이 적절히 동작할 때는 0이고 고장이 일어날 때 0으로부터 벗어난다. 그리고 입력 u 와 출력 y 가 측정 가능하다고 가정한다.

본 논문에서는 궁극적으로 다음과 같은 형태를 가지는, 고장분리 필터(fault isolation filter)라고 불리는 관측기를 설계하고자 한다.

$$\dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + Bu(t) + H(y(t) - C\hat{x}(t)), \quad \hat{x}(t_0) = \hat{x}_0 \quad (3)$$

$$r(t) = R(y(t) - C\hat{x}(t)) \quad (4)$$

여기서, $r(t) \in R^m$ 은 잔류오차 벡터이다.

이제 $\epsilon = x - \hat{x}$ 를 상태 추정 오차라 두자. 그러면 잔류오차 r 은 다음 식들에 의해 표현된다.

$$\dot{\epsilon}(t) = (A - HC)\epsilon(t) + Ef(t), \quad \epsilon(t_0) = x_0 - \hat{x}_0 \quad (5)$$

$$r(t) = RC\epsilon(t) \quad (6)$$

여기서, $\epsilon(t_0)$ 는 상태추정의 초기 오차이다. 여기서 적절한 차원의 행렬 H 와 R 이 선정되면, 잔류오차의 i

번째 요소는 i 번째 고장에 의해서만 근사적으로 영향을 받게 된다.

III. 문제의 설정

(5) 및 (6)으로 기술되는 관측기를 고려하면 잔류오차 r 은 다음의 식과 같이 시간응답에 대한 식으로 다시 표현될 수 있다.

$$r(t) = RCe^{(A-HC)(t-t_0)}\epsilon(t_0) + RC \int_{t_0}^t e^{(A-HC)(t-\tau)} Ef(\tau) d\tau \quad (7)$$

여기서 $\epsilon(t_0)$ 는 초기 상태 추정오차이고, 미지수로 가정한다. 만일 $(A-HC)$ 의 고유치들이 음의 실수부를 가진다면, 초기 추정오차의 영향은 시간 t 가 무한대로 접근함에 따라 사라지게 된다. 따라서 위의 (7)은 다음과 같이 더 단순화된 식으로 표시할 수 있다.

$$r(t) = RC \int_{t_0}^t e^{(A-HC)(t-\tau)} Ef(\tau) d\tau \quad (8)$$

고장 $f(t)$ 에 기인한 주어진 시스템의 응답은 우, 좌 모드 행렬을 사용하여 표현하면 다음과 같다[14].

$$r(t) = RC\Phi \int_{t_0}^t e^{\Lambda(t-\tau)} \Psi^T Ef(\tau) d\tau \quad (9)$$

여기서 Λ 는 원하는 고유치들이 대각선상에 배치된 대각 행렬이다. 그리고 Φ 와 Ψ 는 각각 주어진 시스템의 우, 좌 모드 행렬이다. 결국 고장분리 필터의 설계 문제는, (7)에서 알 수 있는 바와 같이 초기오차 항의 영향을 줄이면서 고장 분리가 성립되도록 설계 파라미터 행렬 H 와 R 을 선정하는 문제가 된다.

따라서 본 논문에서는 좌 고유구조 지정을 통한 고장 분리가 이루어지도록, 설계 파라미터 행렬 H 와 R 을 선정하는 것을 문제로 삼는다.

IV. 고장분리를 위한 고유구조 조건

본 장에서는 고장분리를 위한 고유구조의 조건을 고찰하기 위하여 다음의 두 경우를 고려한다.

경우 1 : ($\text{rank}(C) = n$) 이 경우, (9)의 $\Psi^T E$ 와 $RC\Phi$ 를 다음과 같이 구성하면 고장분리가 성립한다.

$$\Psi^T E = \begin{bmatrix} I \\ x \\ x \\ x \end{bmatrix}_{n \times m} \quad (10)$$

$$RC\Phi = [I \mid 0]_{m \times n} \quad (11)$$

여기서 행렬 $\Psi^T E$ 의 'x'는 임의의 값을 의미한다.

경우 2 : ($\text{rank}(C) < n$) 이 경우 (10)과 (11)은 다음과 같이 수정된 다른 형태로 쓸 수 있다.

$$\Psi^T E = \begin{bmatrix} I \\ 0 \end{bmatrix}_{n \times m} \quad (12)$$

$$RC\Phi = [I \mid x \ x \ x]_{m \times n} \quad (13)$$

여기서 행렬 $RC\Phi$ 의 'x'도 임의의 값을 의미한다. 그리고 행렬 $\Psi^T E$ 는 반드시 (12)의 형태로 구성하여야 한

다. 왜냐하면, 경우 1에서는 $C\Phi$ 가 $(n \times n)$ 의 차수를 가지므로 행렬 $RC\Phi$ 를 $[I \ 0]_{m \times n}$ 의 형태로 구성하는 R 을 구할 수 있으나, 경우 2에서는 $C\Phi$ 가 $(m \times n)$ 의 차수(여기서 항상 $m < n$ 이다)를 가지므로 어떠한 R 도 행렬 $RC\Phi$ 를 $[I \ 0]_{m \times n}$ 의 형태로 구성할 수 없기 때문이다.

만일 이러한 조건이 경우에 따라 만족된다면, (9)는 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$r(t) = \int_{t_0}^t \begin{bmatrix} e^{\lambda_1(t-\tau)} f_1(\tau) \\ e^{\lambda_2(t-\tau)} f_2(\tau) \\ \vdots \\ e^{\lambda_m(t-\tau)} f_m(\tau) \end{bmatrix} d\tau \quad (14)$$

여기서 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m$ 는 관측기의 원하는 고유치이다. 따라서 본 논문의 목적은 위의 조건을 만족시키는 좌 고유구조(고유치 및 좌 고유벡터)를 지정하고 그에 따른 행렬 H 와 R 을 설정하는 것이 된다.

V. 고장분리를 위한 좌 고유구조 지정

본 장에서는 저자에 의해서 제안된 좌 고유구조 지정 개념[11][12]을 사용하여 고장분리 필터를 설계하는 방법에 대하여 기술한다. 이 방법은 앞 장에서 서술한 조건을 만족시키는 고유벡터 지정을 통하여 동시다발적인 고장의 분리를 가능하게 한다. 본 방법은 또한 원하는 고유치들을 정확하게 원하는 위치에 지정할 수 있으며, 조건(10), (12)를 만족시키는 좌 고유벡터를 획득가능한 공간(achievable space)에서 최적으로 선택할 수 있게 한다. 또한 본 장에서는 이러한 고유벡터를 설정하기 위한 필요조건을 제안한다.

1. 우 고유구조 지정 방법

다음과 같은 다변수 선형 시불변 시스템을 고려하자.

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

여기서 $x \in R^n$, $u \in R^m$, $f \in R^m$ 들은 각각 상태, 제어입력, 그리고 고장 벡터를 의미한다. 만일 상태 되먹임 제어입력인 $u(t) = -Kx(t)$ 가 시스템에 적용되면, 페루프 시스템은 다음과 같이 된다.

$$\dot{x}(t) = (A - BK)x(t) + Ef(t) \quad (15)$$

상이한 공액복소 고유치로 이루어진 집합 Λ 를 $\{\lambda_1, \dots, \lambda_n\}$ 이라 하자. 그러면, 위의 페루프 시스템에 대한 우 및 좌 고유치 문제는 각각 다음과 같이 정의된다 [15].

$$(A - BK - \lambda_i I_n)\phi_i = 0 \quad (16)$$

$$(A - BK - \lambda_i I_n)^T \psi_i = 0 \quad (17)$$

여기서 I_n 은 $(n \times n)$ 의 항등 행렬이다. 시스템이 중복 고유치를 가지는 경우에도 위의 고유치 문제는 쉽게 일반화될 수 있다[16][17].

위의 고유치 문제들로부터 고유구조 지정 문제는 결국 주어진 조건에 따라 요구되는 우 또는 좌 고유구조를 만족시킬 수 있게 하는 되먹임 이득행렬 K 를 구하는 문제가 된다.

고유구조 지정 문제를 구체적으로 기술하기 위하여 우 및 좌 모드 행렬을 다음과 같이 표시하자.

$$\Phi = [\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_i, \dots, \phi_n]$$

$$\Psi = [\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_i, \dots, \psi_n]$$

앞에서 언급한 바와 같이, 고장분리를 위해서는 필터 시스템의 적절한 고유구조 지정이 요구된다. 주어진 고유구조 지정 문제의 기술을 위하여 다음과 같이 정의되는 행렬들을 먼저 정의한다.

$$S_{\lambda_i} = [\lambda_i I_n - A \mid B]$$

$$R_{\lambda_i} = \begin{bmatrix} N_{\lambda_i} \\ - \\ M_{\lambda_i} \end{bmatrix}$$

여기서, 행렬 R_{λ_i} 의 열(columns)들은 행렬 S_{λ_i} 의 영공간의 기저를 이룬다. 그리고 $\text{rank } B = m$ 이면 행렬 R_{λ_i} 의 부분행렬 N_{λ_i} 의 열들은 서로 선형 독립이 된다[18].

다음 정리는 요구되는 우고유구조를 생성시킬 수 있는 이득행렬 K 의 존재를 위한 필요충분조건을 제공한다.

정리 1[18] : 집합 $\{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n\}$ 의 원소들은 상이한 공액복소수로 이루어져 있다고 하자. 그러면 페루프 시스템에 대한 고유치 문제 $(A - BK)\phi_i = \lambda_i \phi_i$, $i = 1, 2, \dots, n$ 를 만족하는 실수로 이루어진 $(m \times n)$ 차원의 이득행렬 K 가 존재하기 위한 필요충분조건은 다음과 같다.

- 1) $\{\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_n\}$ 가 C^n 안에서 선형 독립 집합이다.
- 2) 임의의 두 고유치가 $\lambda_i = \lambda_j^*$ 와 같이 공액복소수 관계를 가지면, 이에 대응하는 고유벡터들도 $\phi_i = \phi_j^*$ 와 같은 공액복소벡터 관계를 가져야 한다. 여기서, 위첨자 $(\cdot)^*$ 는 (\cdot) 의 공액복소수 또는 공액복소벡터를 의미한다.
- 3) $\phi_i = \text{span}\{N_{\lambda_i}\}$.

또한, K 가 존재하고 $\text{rank } B = m$ 이면 이 때 K 는 유일하게 결정되고, 위에서 정의한 부분행렬 N_{λ_i} 과 M_{λ_i} 를 이용하여 구할 수 있다.

위의 정리를 살펴 보면 상태되먹임에 의해 페루프 시스템의 우 고유구조를 지정하고자 할 때, 요구되는 우고유벡터들은 행렬 $[\lambda_i I_n - A \mid B]$ 의 영공간으로부터 생성되는 열공간(column space)의 일부인 부분행렬 N_{λ_i} 로부터 생성되는 열공간에 속해야만 한다는 제약을 가지고 있음을 알 수 있다. 이러한 제약으로 인하여 획득 가능한 우고유벡터들은 m 과 n 의 관계에 따라 최소한 최소자승의 관점에서 최적인 값들을 가지게 된다.

2. 관측기의 좌 고유구조

(15)에서 주어진 식이 편의상 서로 다른 고유치를 가진다고 가정하고 다시 쓰면 다음과 같다.

$$\dot{x}(t) = (A - BK)x(t) + Ef(t)$$

관측기의 좌 고유구조를 지정하기 위해서, 우 고유구조에 대한 쌍대(dual) 개념을 주어진 페루프 시스템에 적용한다. 그러면 페루프 시스템의 우 및 좌 고유치 문

제는 다음과 같이 정의된다.

$$(A - BK)\phi_i = \lambda_i \phi_i \quad : \text{Right} \quad (18)$$

$$\phi_i^T(A - BK) = \lambda_i \phi_i^T \quad : \text{Left} \quad (19)$$

이제 쌍대 개념을 (19)에 적용시켜 보자. 그러면 관측기의 좌 고유치 문제는 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$\{\phi_i^T(A - HC)\}^T = (A^T - C^T H^T)\phi_i = \lambda_i \phi_i \quad (20)$$

결과적으로 관측기의 좌 고유구조는 제어기 설계에 있어서 우 고유구조와 같다. 그러므로 관측기의 좌 고유구조를 원하는 값 및 방향을 갖도록 설정하기 위해서는 먼저 관측기 시스템에 쌍대 개념을 적용하여 제어기 설계문제와 같게 놓고, 참고문헌 [11]-[13]에 기술된 고유구조 지정기법을 사용하여 관측기의 좌 고유구조를 지정한다.

3. 고장분리를 위한 새로운 고유구조 지정방법

앞에서 기술한 바와 같이, 고유구조 지정 문제에 있어서 바람직한 우 고유벡터는 행렬 N_{λ_i} 의 열벡터들에 의해 구성되는 영공간 속에 존재해야 한다.(이 행렬은 행렬 $[\lambda_i I_n - A | B]$ 의 영공간으로부터 구성된다) 만일 이 바람직한 고유벡터가 이 N_{λ_i} 의 선형조합에 의해서 생성되는 부분공간안에 포함되어 있지 않으면, 고유벡터는 지정될 수 있는 위치 중에서 최소자승의 개념에 의해서 최적으로 지정되게 된다. 그러나 이러한 기존의 고유구조 지정방법들은 고장 분리의 문제에는 직접적으로 쓰여 질 수 없다. 왜냐하면, 정확히 주어진 조건(10), (12)를 만족시키는 고유벡터만이 고장 분리를 수행할 수 있기 때문이다. 따라서 본 논문에서는 이러한 조건을 만족시키는 바람직한 고유벡터를 행렬 N_{λ_i} 에 의해 생성되는 부분공간에서 선택할 수 있는 알고리즘을 제안한다. 알고리즘의 자세한 내용은 다음과 같다.

먼저, E 의 새로운 영공간 행렬을 다음과 같은 형태로 선정하고, 이것을 N_E^a 라 표기하자.

$$N_E^a = [\text{Null}(E_1^T) \text{Null}(E_2^T) \cdots \text{Null}(E_m^T) | \text{Null}(E^T) \cdots \text{Null}(E^T)] \quad (21)$$

여기서 E_i 는 i 번째 열이 제외된 E 의 블록 행렬이다. 그리고 $\text{Null}(\cdot)$ 은 (\cdot) 의 영공간을 의미한다.

만일 관측기의 좌 고유구조가 N_E^a 의 열벡터들의 선형조합에 의해서 이루어 질 수 있다면, $\Psi^T E$ 는 아직 대각 요소들이 정규화되어 있지는 않지만 (12)의 형태를 가지게 된다.

다음으로 고려할 사항은 어떻게 N_E^a 를 N_{λ_i} 의 열벡터들에 의해서 만들어진 부분공간 속에 잡는가 하는 문제이다. 이 문제를 풀기 위해서는 다음 식을 만족시키는 매개변수 p_i 와 q_i 를 찾을 필요가 있다.

$$\phi_i^d = [N_{\lambda_i}] \cdot p_i = [\text{Null}(E_i^T)] \cdot q_i, \quad (i=1, \dots, m)$$

$$\phi_i^d = [N_{\lambda_i}] \cdot p_i = [\text{Null}(E^T)] \cdot q_i, \quad (i=m+1, \dots, n)$$

이 매개변수들은 다음의 행렬 $[N_{\lambda_i} | -\text{Null}(E_i^T)]$ 의 영공

간에서 구해질 수 있다.

$$\begin{bmatrix} p_i \\ - \\ q_i \end{bmatrix} = \text{Null}([N_{\lambda_i} | -\text{Null}(E_i^T)]), \quad (i=1, \dots, m) \quad (22)$$

$$\begin{bmatrix} p_i \\ - \\ q_i \end{bmatrix} = \text{Null}([N_{\lambda_i} | -\text{Null}(E^T)]), \quad (i=m+1, \dots, n) \quad (23)$$

그러나 이 매개변수들은 어떤 경우에는 존재하지 않을 수도 있다. 즉, 행렬 $[N_{\lambda_i} | -\text{Null}(E_i^T)]$ 가 열 보다 행의 수가 많을 때는 영공간이 생기지 않으므로 매개변수 p_i 와 q_i 는 존재하지 않게 된다.

그러므로 매개변수 p_i 와 q_i 의 존재를 보장해 줄 조건이 필요하다. 이 조건을 찾기 위해서 행렬 $[N_{\lambda_i} | -\text{Null}(E_i^T)]$ 의 차원을 좀 더 자세히 살펴보자. 행렬 $[N_{\lambda_i} | -\text{Null}(E_i^T)]$ 의 차원은 다음과 같다.

$$[N_{\lambda_i} | -\text{Null}(E_i^T)] = [\cdot]_{n \times (n-m+l+1)}, \quad (i=1, \dots, m)$$

$$[N_{\lambda_i} | -\text{Null}(E^T)] = [\cdot]_{n \times (n-m+l)}, \quad (i=m+1, \dots, n)$$

영공간의 존재를 위해서는 적어도 $(n-m+l)$ 이 n 보다 큰 값을 가져야만 한다. 이것은 다른 말로 하면, 출력 측정치의 수 l 이 적어도 $(m+1)$ 의 값을 가져야 함을 의미한다. 즉, m 개의 동시다발적인 고장을 구분하기 위해서는 적어도 $(m+1)$ 개의 측정치 출력이 존재하여야 한다고 말할 수 있다.

4. 필터 설계 알고리즘

앞에서 기술한 필터의 설계과정들을 정리하면 다음과 같다.

단계 1 : 주어진 시스템을 다음과 같이 바꾸어 제어기 설계문제와 같이 놓는다.

$$\bar{A} = A^T, \quad \bar{B} = C^T, \quad K = -H^T$$

단계 2 : 바람직한 고유치(λ_i)을 설정한다.

단계 3 : 선정된 고유치에 따라 다음과 같은 행렬들을 찾는다. 여기서 R_{λ_i} 의 열벡터들은 S_{λ_i} 의 영공간을 위한 기저를 구성한다.

$$S_{\lambda_i} \equiv [\lambda_i I_n - \bar{A} | \bar{B}], \quad R_{\lambda_i} \equiv \begin{bmatrix} N_{\lambda_i} \\ - \\ M_{\lambda_i} \end{bmatrix}$$

단계 4 : 고장 행렬 E 를 가지고 (21)과 같은 행렬을 구성한다.

단계 5 : 각 N_{λ_i} 들을 가지고 다음과 같은 Φ_{aug}^a 를 구성한다.

$$\Phi_{aug}^a = [N_{\lambda_1}, N_{\lambda_2}, \dots, N_{\lambda_m}, \dots, N_{\lambda_n}], \quad (i=1, \dots, n)$$

단계 6 : 매개변수 벡터 p_i 와 q_i 를 결정한다. 이 식들은 N_E^a 의 열벡터들의 선형조합이 정확히 Φ_{aug}^a 의 부분공간안에 속하도록 하여 준다.

$$\begin{bmatrix} p_i \\ - \\ q_i \end{bmatrix} = \text{Null}([N_{\lambda_i} | -\text{Null}(E_i^T)]), \quad (i=1, \dots, m) \quad (24)$$

$$\begin{bmatrix} p_i \\ - \\ q_i \end{bmatrix} = \text{Null}([N_{\lambda_i} | -\text{Null}(E^T)]), \quad (i=m+1, \dots, n) \quad (25)$$

단계 7 : $\Psi^T E$ 대각 요소들의 정규화를 위해서는 새로운 매개변수 벡터 p_i^N 를 선정하여야 하는데 그 식은 다음과 같다.

$$p_i^N = \frac{p_i}{(N_{\lambda_i} \times p_i)^T \times E_i} \quad (26)$$

단계 8 : 획득가능한 우고유벡터 Φ^a 를 앞에서 설정된 p_i^N 를 가지고 다음과 같이 구성한다.

$$\Phi^a = \Phi_{aug}^a P_N, \quad P^N = [p_1^N, p_2^N, p_n^N]$$

단계 9 : 행렬 W 를 다음과 같이 구성한다.

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

단계 10 : 앞 단계에서 계산한 Φ^a 와 W 를 이용하여 이득행렬 K 를 다음과 같이 계산한다.

$$K = W(\Phi^a)^{-1} \quad (27)$$

단계 11 : $C\Phi$ 를 구성한다. 제시된 설계 과정에서 쌍대 개념이 적용되었기 때문에 실제로 이 행렬은 $B^T \Psi (= C(\Phi^a)^{-1})$ 을 계산하므로써 얻어질 수 있다. 여기서 Φ 는 원래시스템의 우 모드 행렬이고, Φ^a 는 쌍대 시스템의 우 모드 행렬이다.

단계 12 : (11)과 (13)의 주어진 조건을 만족시킬 수 있는 잔차출력 행렬 R 을 계산한다. 이 행렬은 앞 단계에서 소개된 C 의 랭크조건에 따라, $C(\Phi^a)^{-1}$ 의 적절한 부분행렬을 취해서 역을 취하면 구해질 수 있다.

단계 13 : 원래 시스템의 이득행렬 H 는 결국 다음 식에 의하여 구해질 수 있다.

$$H = -K^T \quad (28)$$

VI. 수치예제 및 비행체 시스템에의 응용

본 논문에서 제안한 고장분리 필터 설계 방법을 간단한 수치예제와 비행체 시스템에 적용하여 그 타당성 및 유용성을 검증한다.

1. 수치예제

다음과 같이 주어지는 두 개의 입력을 가진 4차의 연속 가제어 시스템을 고려하자.

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

$$= \begin{bmatrix} -9.947 & -0.7476 & 0.2632 & 5.0337 \\ 52.1659 & 2.7452 & 5.5532 & -24.4221 \\ 26.0922 & 2.6361 & -4.1975 & -19.2774 \\ 0.0 & -0.0 & 1.0 & 0.0 \end{bmatrix} x(t)$$

$$+ \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} u(t) + \begin{bmatrix} 1 & 2 \\ 2 & 0 \\ 1 & 1 \\ 3 & 1 \end{bmatrix} f(t)$$

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

$$= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} x(t)$$

준 시스템 A 의 개루프 시스템의 고유치는 다음과 같이 주어진다.

$$\lambda^{open} = \{ -6.8262, -1.0117 \pm 1.5146i, -2.5498 \}$$

이때 원하는 페루프 시스템의 고유치를 다음과 같이 두자.

$$\lambda^d = \{ \lambda_1^d, \lambda_2^d, \lambda_3^d, \lambda_4^d \} = \{ -1, -2, -3, -4 \}$$

이제 (12)를 만족하는 좌 모드행렬을 5장에서 기술한 설계 알고리즘에 따라 차례대로 계산해 보기로 한다.

먼저 $R_{\lambda_1}, R_{\lambda_2}, R_{\lambda_3}, R_{\lambda_4}$ 를 차례대로 계산하면 다음과 같다.

$$R_{\lambda_1} \equiv \begin{bmatrix} N_{\lambda_1} \\ \dots \\ M_{\lambda_1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.7224 & 0.0 & 0.0 \\ -0.0658 & -0.0872 & -0.0329 \\ -0.0916 & 0.1625 & 0.0614 \\ 0.1925 & 0.4991 & 0.8057 \\ 0.6392 & -0.3074 & -0.1161 \\ 0.1222 & 0.6065 & -0.3881 \\ -0.0702 & -0.5046 & 0.4266 \end{bmatrix},$$

$$R_{\lambda_2} \equiv \begin{bmatrix} N_{\lambda_2} \\ \dots \\ M_{\lambda_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.9373 & 0.0 & 0.0 \\ -0.0311 & -0.0328 & 0.1005 \\ -0.2159 & 0.0419 & -0.2161 \\ -0.1480 & -0.2682 & -0.6787 \\ 0.1940 & -0.6191 & -0.3961 \\ 0.0767 & 0.4974 & -0.4473 \\ -0.0926 & -0.5427 & 0.3545 \end{bmatrix},$$

$$R_{\lambda_3} \equiv \begin{bmatrix} N_{\lambda_3} \\ \dots \\ M_{\lambda_3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.9698 & 0.0 & 0.0 \\ -0.0124 & -0.1276 & 0.0385 \\ -0.2326 & 0.2697 & -0.0456 \\ 0.0242 & 0.5254 & 0.1650 \\ 0.0194 & 0.3795 & 0.8191 \\ 0.0621 & 0.4842 & -0.3323 \\ -0.0217 & -0.5064 & 0.4334 \end{bmatrix},$$

$$R_{\lambda_4} \equiv \begin{bmatrix} N_{\lambda_4} \\ \dots \\ M_{\lambda_4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.9469 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0207 & 0.0252 & 0.1952 \\ -0.2567 & -0.0863 & -0.3874 \\ 0.0803 & -0.2969 & -0.5132 \\ 0.0146 & -0.9367 & 0.0759 \\ 0.1742 & 0.0825 & -0.3518 \\ -0.0032 & -0.1400 & 0.6473 \end{bmatrix}.$$

이렇게 구하여진 $N_{\lambda_1}, N_{\lambda_2}, N_{\lambda_3}, N_{\lambda_4}$ 를 가지고 매개변수 p_i 와 q_i ($i=1, \dots, n$)는 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$\begin{bmatrix} p_1 \\ \dots \\ q_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.4518 \\ -0.3759 \\ -0.4135 \\ \dots \\ -0.5653 \\ 0.2275 \\ -0.3351 \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} p_2 \\ \dots \\ q_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.6184 \\ -0.1732 \\ -0.4303 \\ \dots \\ 0.5999 \\ -0.0649 \\ 0.1957 \end{bmatrix},$$

$$\begin{bmatrix} p_3 \\ \dots \\ q_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.0835 \\ 0.3625 \\ -0.9122 \\ \dots \\ -0.1717 \\ 0.0026 \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} p_4 \\ \dots \\ q_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.0854 \\ 0.8170 \\ -0.5439 \\ \dots \\ -0.1715 \\ 0.0052 \end{bmatrix}.$$

여기서 $\Psi^T E$ 대각 요소들의 정규화를 위한 새로운 매개변수 벡터 p_i^N ($i=1, \dots, n$)는 다음과 같이 계산된다.

$$p_1^N = \begin{bmatrix} -0.3252 \\ -0.2705 \\ -0.2976 \end{bmatrix}, \quad p_2^N = \begin{bmatrix} 1.2883 \\ -0.3609 \\ -0.8964 \end{bmatrix},$$

$$p_3^N = p_3, \quad p_4^N = p_4.$$

이러한 단계들을 거쳐서 구하여진 Ψ 는 다음과 같으며 이 값은 정확히 (12)를 만족시킨다.

$$\Psi = \begin{bmatrix} -0.2349 & 0.6037 & -0.0809 & -0.0808 \\ -0.0548 & 0.0591 & -0.0824 & -0.0838 \\ 0.0324 & 0.0498 & 0.1199 & 0.1183 \\ 0.4373 & -0.2573 & 0.0420 & 0.0434 \end{bmatrix}$$

만약 Ψ 가 결정되면, $C\Phi$ 도 역시 결정될 수 있다. 이와 같이 계산된 $C\Phi$ 값은 다음과 같다.

$$C\Phi = \begin{bmatrix} 1.0000 & 2.0000 & -61.3430 & 61.0777 \\ 2.0000 & 0.0000 & 415.5117 & -421.8213 \\ 6.0000 & 2.0000 & 668.2516 & -671.5509 \end{bmatrix}$$

여기서 $C\Phi$ 앞부분의 정방행렬을 따로 취하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} 1.0000 & 2.0000 & -61.3430 \\ 2.0000 & 0.0000 & 415.5117 \\ 6.0000 & 2.0000 & 668.2516 \end{bmatrix}$$

다음으로 위의 행렬의 역을 취하여 \hat{R} 을 얻을 수 있다. 그러나 이 행렬 \hat{R} 은 우리가 구하고자 하는 잔류오차 행렬 R 의 전단계이다.

$$\hat{R} = \begin{bmatrix} -0.6719 & -1.1799 & 0.6719 \\ 0.9352 & 0.8379 & -0.4352 \\ 0.0032 & 0.0081 & -0.0032 \end{bmatrix}$$

이 과정후 출력에 영향을 미치지 않는 마지막 행을 제거하면, 다음과 같이 최종적으로 의도했던 잔류오차 행렬 R 을 구할 수 있다.

$$R = \begin{bmatrix} -0.6719 & -1.1799 & 0.6719 \\ 0.9352 & 0.8379 & -0.4352 \end{bmatrix}$$

이득 행렬 H 는 (28)에 의해서 다음과 같이 주어진다 (이 행렬은 Ψ 가 선정되면 이미 정해지게 된다).

$$H = \begin{bmatrix} -12.6228 & -13.2004 & 7.3243 \\ 87.2097 & 85.8014 & -44.4782 \\ 46.0167 & 54.1450 & -30.6620 \\ 0.9377 & -0.1558 & 0.5623 \end{bmatrix}$$

구하여진 H 와 R 을 가지고 MATLAB/Simulink로 그림 1과 같은 시스템을 구성한 후 시뮬레이션을 수행하였다.

시뮬레이션 과정에서는 다음의 세가지 경우와 같은 고장이 시스템에 발생하였다고 가정하였다. 이때 각각의 시뮬레이션 결과를 그림 2, 3 및 4에 도시하였다.

경우 1 : 고장 입력1(f_1)에서 $t \geq 5s$ 일때 발생하는 바이어스 고장($f_1 = 5.0$)

경우 2 : 고장 입력2(f_2)에서 $t \geq 10s$ 일때 발생하는 바이어스 고장($f_2 = 3.0$)

경우 3 : 다음의 식들과 같은 고장이 동시에 발생하는 상태

$$f_1 = 5.0 \quad (t \geq 5s), \quad f_2 = 3.0 \quad (t \geq 10s)$$

시뮬레이션 결과는 고장분리 필터가 잘 작동하고 있음을 보여준다. 그림 2는 고장이 $t=5s$ 에 발생했으며, 필터의 출력이 다른 시스템 상태에 영향을 받지 않고 고장입력을 잘 추종하고 있음을 보여준다. 그림 3에서는 고장이 $t=10s$ 에서 발생했으며, 역시 필터의 출력이 고장입력을 잘 추종하고 있음을 알 수 있다. 그림 4에서는 두 개의 고장이 동시에 일어났음에도 불구하고, 필터의 출력에서는 고장 신호가 섞이지 않고 각각 분리되어 출

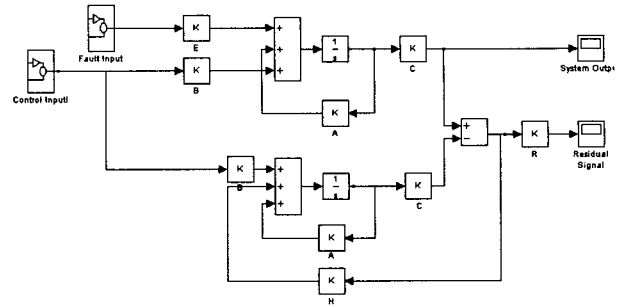


그림 1. 시뮬레이션을 위한 MATLAB/Simulink 구성도.

Fig. 1. MATLAB/Simulink blocksets for the simulation.

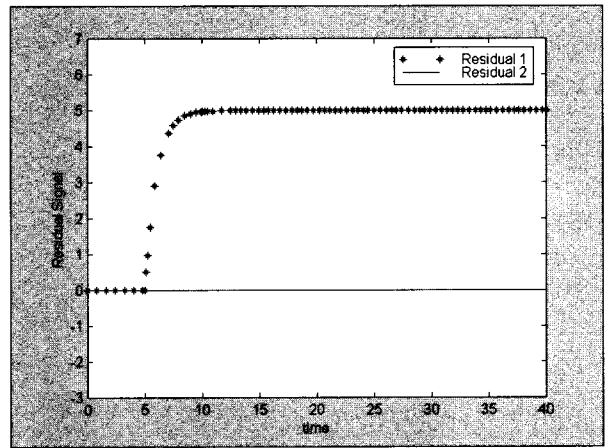


그림 2. 잔류오차 r에 나타나는 고장 f_1 .

Fig. 2. Fault f_1 corrupted in the residual r.

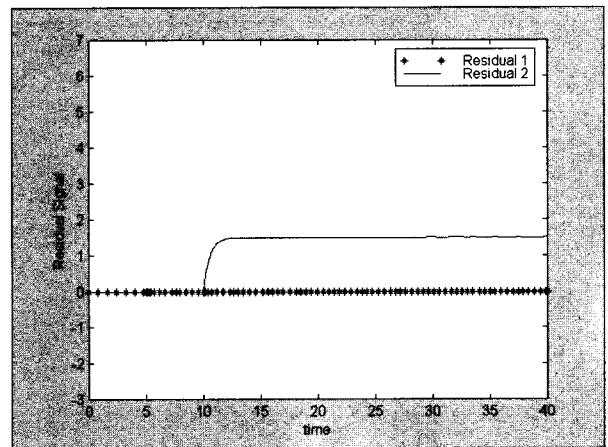


그림 3. 잔류오차 r에 나타나는 고장 f_2 .

Fig. 3. Fault f_2 corrupted in the residual r.

력되는 것을 보여주고 있다.

만일 참고문헌 [8]에서 제안된 Liu와 Si의 필터 설계 방법을 위의 예제에 적용하면, 관측기 시스템은 불안정한 근을 가지게 되므로, 결과적으로 잔류오차 출력은 불안정하게 된다. 그러므로 그들의 방법은 이 예제에는 직

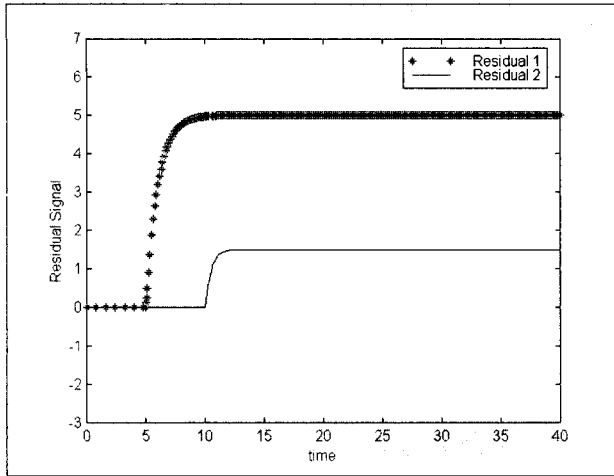


그림 4. 잔류오차 r에 나타나는 고장 f_1, f_2 .
Fig. 4. Faults f_1, f_2 corrupted in the residual r.

접 쓰여질 수 없다.

2. L-1011 비행체에 대한 고장분리 필터 설계

순항중인 L-1011 비행체의 측면 동역학 모델에 고장 입력을 고려하여 구성된 식에 대하여 필터를 설계하였다. 시스템 모델은 다음 요소들로 구성되어 있다. 우선 상태벡터는 다음과 같이 주어진다.

$$x = [\delta, \delta_a, \phi, r, p, \beta, x_r]^T$$

각 상태들은 각각 방향타 변위(rad), 보조익 변위(rad), 선회각(rad), 요각변화율(rad/sec), 롤각변화율(rad/sec), 옆미끄럼각(rad), 유실필터의 상태를 의미한다. A, B 행렬과 고장행렬 E 및 출력행렬 C는 다음과 같다.

$$A = \begin{bmatrix} -20 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -25 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ -0.744 & -0.032 & 0 & -0.154 & -0.0042 & 1.54 & 0 \\ 0.337 & -1.12 & 0 & 0.249 & -1 & -5.2 & 0 \\ 0.02 & 0 & 0.0386 & -0.996 & -0.000295 & -0.117 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.5 & 0 & 0 & -0.5 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 20 & 0 \\ 0 & 25 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad E = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0.0042 & -1.54 \\ 1 & 5.2 \\ 0.000295 & 0.117 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

또한 제어입력은 다음과 같이 주어진다.

$$u = [\delta_{rc}, \delta_{ac}]^T$$

여기서 각각은 방향타명령(rad)과 보조익명령(rad)을 의미한다.

먼저 개루프 시스템의 고유치들을 살펴 보면 다음과 같다.

$$\Lambda^{open} = \{\lambda_1^0, \lambda_2^0, \lambda_{3,4}^0, \lambda_5^0, \lambda_6^0, \lambda_7^0\}$$

$$= \{-20.0, -25.0, -0.0882 \pm 1.2695j, -1.0855, -0.0092, -0.5\}$$

이제 관측기의 원하는 고유치를 다음과 같이 선정하자.

$$\Lambda^d = \{\lambda_1^d, \lambda_2^d, \lambda_3^d, \lambda_4^d, \lambda_5^d, \lambda_6^d, \lambda_7^d\}$$

$$= \{-1.0, -2.0, -3.0, -4.0, -5.0, -6.0, -7.0\}$$

그러면 앞에서 소개된 과정에 의해서 고장분리를 가능하게 하는 Ψ 를 구할 수 있게 되고, 원하는 Ψ 로 지정하는 이득행렬 H는 다음의 값과 같이 구할 수 있다.

$$H = \begin{bmatrix} 18.9422 & 21.9933 & -18.9670 \\ -847.1782 & -983.6380 & 848.2867 \\ -84.3748 & -99.0461 & 85.4859 \\ -70.7862 & -80.3236 & 70.8703 \\ -186.0004 & -218.8853 & 186.2564 \\ 43.5905 & 49.3835 & -43.6462 \\ -12.7340 & -14.2448 & 12.7503 \end{bmatrix}$$

그리고 잔류오차행렬 R은 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$R = \begin{bmatrix} 28.0527 & 35.1034 & -27.1049 \\ 27.9526 & 31.7604 & -27.9861 \end{bmatrix}$$

앞의 수치예제와 마찬가지로 구하여진 H와 R을 가지고 MATLAB/Simulink로 시스템을 구성한 후 시뮬레이션을 수행하였다. 이번에는 다음과 같은 두개의 고장을 설정하여 시스템에 동시에 발생하였다고 가정하였다.

$$f_1 = \sin(t) \quad (t \geq 0s), \quad f_2 = t \quad (t \geq 10s)$$

이에 따른 잔류오차 출력 그래프는 다음과 같다.

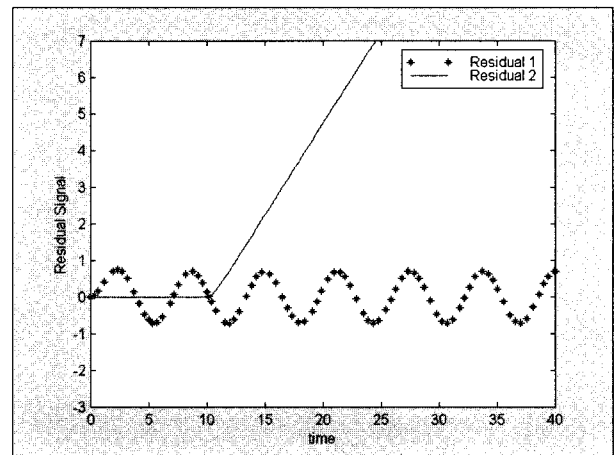


그림 5. 잔류오차 r에 나타나는 고장 f_1, f_2 .
Fig. 5. Faults f_1, f_2 corrupted in the residual r.

주어진 그림 5에서 알 수 있듯이 잔류오차 출력들은 고장이 허용된 시각부터 고장신호를 잘 추종하고 있음을 알 수 있다.

VII. 결론

본 논문에서는 좌 고유구조 지정방법을 이용한 고장분리 필터 설계 방법을 제안하였다. 이 필터를 사용하기 위해서는 시스템이 관측가능하여야 하고, m개의 동시발생 가능한 고장이 있을 경우 (m+1)개의 출력 측정치가 필요하다. 제안된 필터 설계방법은 필터 시스템의 모든 고유치들을 원하는 위치에 옮겨 놓을 수 있다. 간단한 수치예제와 L-1011 비행체 시스템에 대하여 필터를 설계하여 그 성능과 유용성을 확인하였다.

참고문헌

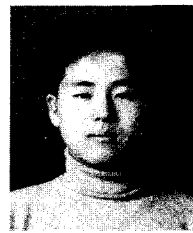
[1] J. Park and G. Rizzoni, "An eigenstructure assignment algorithm for the design of fault

- detection filters," *IEEE Trans. Automatic Control*, vol. AC-39, no. 7, pp. 1521-1524, 1994.
- [2] M. A. Massoumnia and W. E. Vander Velde, "Generating parity relation for detecting and identifying control system component failures," *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, vol. 11, no. 1, pp. 60-65, 1988.
- [3] M. Saif and Y. Guan, "A new approach to robust fault detection and identification," *IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems*, vol. AES-29, no. 3, pp. 685-693, 1993.
- [4] J. W. Choi, "Comment on, "A new approach to robust fault detection and identification"," *IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems*, vol. 32, no. 3, pp. 1137-1138, July, 1996.
- [5] A. Willsky, "A survey of design method for failure detection in dynamic systems," *Automatica*, vol. 12, pp. 601-611, 1976.
- [6] R. Isermann, "Process fault detection based on modeling and estimation methods - a survey," *Automatica*, vol. 20, pp. 387-404, 1984.
- [7] P. Frank, "Fault diagnosis in dynamic systems using analytical and knowledge-based redundancy - a survey and some new results," *Automatica*, vol. 26, 1990.
- [8] B. Liu and J. Si, "Fault isolation filter design for linear time-invariant systems," *IEEE Trans. Automatic Control*, vol. AC-42, no. 5, pp. 704-707, 1997.
- [9] R. Patton and J. Chen, "Robust fault detection using eigenstructure assignment: A tutorial consideration and some new results," in *Proc. of 30th Conf. Decision Contr.*, pp. 2242-2247, 1991.
- [10] R. Patton and S. M. Kangethe, *Fault Diagnosis in Dynamic Systems : Theory and Applications*, Englewood Cliffs, NJ, Prentice Hall, 1989.
- [11] J. W. Choi, J. G. Lee, Y. Kim and T. S. 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.
- [12] J. W. Choi, "A simultaneous assignment methodology of right/left eigenstructures," *IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems*, vol. 34, no. 2, pp. 625-634, April, 1998.
- [13] J. W. Choi and Y. B. Seo, "LQR design with eigenstructure assignment capability," to appear in the *IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems*, vol. 35, no. 2, April, 1999.
- [14] 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.
- [15] C. T. Chen, *Linear System Theory and Design*, New York, Holt, Rinehart and Winston, 1984.
- [16] G. Klein and B. C. Moore, "Eigenvalue-generalized eigenvector assignment with state feedback," *IEEE Trans. Automatic Control*, vol. AC-22, no. 1, pp. 140-141, 1977.
- [17] B. H. Kwon and M. J. Youn, "Eigenvalue-generalized eigenvector assignment by output feedback," *IEEE Trans. Automatic Control*, vol. AC-32, no. 5, pp. 417-421, 1991.
- [18] A. N. Andry, E. Y. Shapiro and J. C. Chung, "Eigenstructure assignment for linear systems," *IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems*, vol. AES-19, no. 5, pp. 711-729, 1983.



최재원

1987년 서울대 제어계측공학과 졸업. 동대학원 석사(1989), 동대학 박사(1995). 1995.2-1995.3 일본 NASDA/TKSC 방문연구원. 1995.9-1996.2 미국 USC 방문연구원. 1998.1-1998.2 미국 LSU 방문연구원. 1996-현재 부산대학교 제어계측공학과 조교수. 관심분야는 건설 고유구조 지정 이론, 선형 시변 시스템 이론, 항법 및 유도 제어 시스템, 자동차 현가장치 제어.



이대영

1997년 부산대 제어계측공학과 졸업. 1997-현재 부산대 지능기계공학과 석사과정, 관심분야는 고장 감지 및 분리, reconfigurable control, 고유구조 지정 및 응용.