

좌 고유구조지정 기법을 이용한 견실 고장 분리 필터 설계

Design of a Robust Fault Isolation Filter Using Left Eigenstructure Assignment Scheme

이 대영, 최재원**

* 부산대학교 기계공학부(Tel : 051-510-3203; Fax : 051-510-2470; E-mail: daylee@hyowon.pusan.ac.kr)

** 부산대학교 기계공학부(Tel : 051-510-2470; Fax : 051-510-2470; E-mail: choijw@hyowon.pusan.ac.kr)

Abstract : In this paper, we propose a novel robust fault isolation filter design method using the left eigenstructure assignment scheme proposed by author. An eigenstructure assignment methodology that satisfies the required fault isolation conditions is also proposed. The proposed method guarantees that the corrupted r simultaneous faults can be isolated when the numbers of available output measurements are r .

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

1. 서론

최근에, 항공, 화학, 자동차 등의 산업에서 모델에 근거한 고장 감지 및 분리(fault detection and isolation)이론에 대한 관심이 날이 갈수록 증대되고 있다. 초창기 고장 감지 및 분리는 하드웨어 중복(hardware redundancy)에 의하여 이루어 질 수 있었다. 그러나, 근래 들어 이러한 고장 감지 및 분리기법에서 관심사는 대규모의 하드웨어 중복보다는 잔차 분석(analytic redundancy)쪽으로 옮겨지고 있는 추세이다[1]. 이전에 개발된 잔차 분석 기법들은 동시 다발 고장에 대해서 다중의 필터가 제공되어야 한다. 그러나, 참고 문헌 [2]에서 Liu와 Si는 새로운 필터 디자인 방법을 제안하였다. 여기서 제안된 필터 디자인 방법은 근사적으로 동시 다발 고장을 하나의 전 상태 관측기를 통하여 분리하는데 목적이 있다. 이 고장 분리 설계 방법은 정상상태 피드백 불연성화 방법을 이용한다. 이러한 방법으로 사용자는 만일 r 개의 출력 측정치만 있으면, r 개의 동시 다발 고장을 분리할 수 있다. 그러나 이 필터는 $(n-r)$ 개의 지정 불가능한 고유치를 가지게 되고, 더욱이 근사적인 고장 분리의 결과는 이 지정 불가능 고유치가 불안정할 때에는 얻어질 수 없다. 이런 이유로 Liu와 Si의 방법은 일부 시스템에서는 사용될 수 없다. 본 논문에서는 좌 고유구조 지정 개념[3]을 도입한 새로운 견실 고장 분리 필터 설계방법을 제안한다. 제안되는 필터는 C 의 랭크가 증가해도 성능 개선 효과가 없는 Liu와 Si의 필터와는 달리, C 의 랭크에 따라 다음과 같은 개선 효과를 가진다.

우선 $rank(C) = r$ 인 경우 좌 고유구조지정 기법으로 설계된 필터는 Liu와 Si의 방식으로 설계된 필터와 동일한 결과를 가진다. 그러나, $r < rank(C) < n$ 인 경우는 모든 고유치들(n 개)을 정확하게 원하는 위치에 지정할 수 있어 어떤 경우에도 안정화가 가능하고, $rank(C) = n$ 인 경우에는 시스템 파라미터 변동에 견실한 고장 분리 필터를 설계할 수 있다.

본 논문에서는 고장 분리가 성립되기 위해 요구되는 조건들을 제시하고, 이 조건들을 만족시키는 고유구조지정법을 새로이 제안한다. 결과적으로 본 논문에서 제안되는 고장 분리 필터의 설계 방법은 r 개의 측정치만 있으면, r 개의 동시 고장을 분리할 수 있으며, C 의 랭크가 늘어나면 견실 및 안정한 필터를 설계할 수 있다.

2. 관측기에 기초한 고장 감지 및 분리

다음의 n 차 선형 시불변 시스템을 고려하자.

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

여기서 $x \in R^n$, $u \in R^m$, $y \in R^l$, $f \in R^r$ 등은 각각 상태, 제어입력, 센서 출력, 그리고 고장벡터를 의미한다. A, B, C 는 적절한 차원의 상수 행렬들이다. 풀랭크(full rank)의 $(n \times r)$ 행렬 E 는 고장 행렬로 고려할 수 있고, $f(t)$ 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 $u(t)$ 와 출력 $y(t)$ 가 측정 가능하다고 가정한다.

본 논문에서는 궁극적으로 다음과 같은 형태를 가지는, 고장 분리 필터(fault isolation filter)라는 관측기를 설계하고자 한다.

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

여기서 $\hat{r}(t) \in R^r$ 은 잔류오차 벡터이다. $\epsilon = x - \hat{x}$ 을 상태 추정 오차라 두자. 그러면 잔류오차 $\hat{r}(t)$ 은 다음 식에 의해 표현된다.

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

여기서, $\epsilon(t_0)$ 는 상태추정의 초기 오차로 미지수이다. 적절한 차원의 행렬 H 와 R 이 선정되면, 잔류오차의 i 번째 요소는 i 번째 고장에 의해서만 근사적으로 영향을 받게 된다.

식 (3)은 식 (4)와 같이 시간응답에 관한 식으로 표현될 수 있다.

$$\hat{r}(t) = RCe^{(A-HC)(t-t_0)}\epsilon(t_0) + RC \int_{t_0}^t e^{(A-HC)(t-\tau)} E\hat{f}(\tau) d\tau \quad (4)$$

만일 $(A-HC)$ 의 고유치들이 음의 실수부를 가진다면, 초기 추정오차의 영향은 시간 t 가 증가함에 따라 사라지게 된다. 따라서 식 (4)는 식 (5)와 같이 더 단순화된 식으로 표시할 수 있다

$$\hat{r}(t) = RC \int_{t_0}^t e^{(A-HC)(t-\tau)} E\hat{f}(\tau) d\tau \quad (5)$$

식 (5)에서 우리는 이미 시스템에 고장이 일어나면 이를 감지할 수 있다. 그러나 동시 다발 고장을 분리할 수는 없다. 이러한 r 개의 동시 다발 고장을 분리하기 위해서는 $\hat{r}(t)$ 가 다음과 같은 형태로 구성되어야 한다.

$$\hat{r}(t) = \int_{t_0}^t \begin{pmatrix} e^{\lambda_1(t-\tau)} f_1(\tau) \\ e^{\lambda_2(t-\tau)} f_2(\tau) \\ \vdots \\ e^{\lambda_r(t-\tau)} f_r(\tau) \end{pmatrix} d\tau \quad (6)$$