



모델 기반의 고장 검출 관련 //

김승우 박사 (서울대 전기공학부)
(*서울대 공대 전기공학부)

1. 서 론

각종 산업, 항공, 우주 분야에 사용되는 제어 시스템이 발전함에 따라 이를 구동하기 위한 제어 알고리즘이 복잡해지고 다양해졌다. 이에 따라 각 시스템을 이루는 요소의 동작 신뢰성을 높여서 시스템의 오동작을 방지하는 일이 매우 중요한 위치를 차지하게 되었다. 고장검출 및 분리(Fault Detection and Isolation: FDI) 기법은 시스템의 신뢰성을 높이기 위한 효과적인 방안을 연구하는 것으로 현대에 들어서 많은 학자들의 관심을 끌고 있다[1, 2, 3].

FDI 기법은 하드웨어 중복(hardware redundancy), 혹은 해석적 중복(analytic redundancy)의 형태로 구현된다. 하드웨어 중복은 동일한 기능을 갖는 기기를 두 개 이상 사용하여 고장에 대비하는 것을 의미한다. 이는 쉽게 구현할 수 있다는 장점이 있으나 중복을 구현하고자 하는 곳에 두 개 이상의 기기를 설치해야 하기 때문에 구현에 따른 비용과 설치 장소 등의 문제가 발생할 수 있는 단점이 있다[1, 2, 3]. 하드웨어 중복의 단점을 해결하기 위해 1970년대 이후에 해석적 중복(analytic redundancy) 개념이 제안되었다. 이는 서로 다른 역할을 맡고 있는 기기라 하더라도 시스템의 내부의 동특성에 대한 정보를 이용하면 하드웨어 중복을 이용한 것과 같은 효과를 얻을 수 있다는 사실에 바탕을 두고 있다 [1, 2, 3, 4].

모델 기반(model-based) FDI 기법은 현대 제어 이론을 활용하여 해석적 중복을 구현하는 방법 중의 하나로서 많은 주목을 받아왔다. 이는 시스템의 동작을 표현하는 수학적 모델과 대상 시스템과의 동작의 차이를 양적으로 나타낸 잔차(residual)를 생성하여 이를 통해 고장 발생 여부를 판단하고 고장에 대한 정보, 예를 들면 고장 발생 시각과 위치, 크기 등의 정보를 추출한다. 이 때 고장의 발생 여부를 판단하는 것을 고장 검출(detection)이라 정의하고, 발생에 대한 정보를 추출하는 과정을 고장 분리(isolation)라고 정의한다. 모델 기반 FDI 기법은 잔차를 생성하는 방법에 따라 관측기(observer) 방식, 검출필터(detection filter) 방식, 패리티 공

간(parity space) 방식, 파라메터 추정 방식의 네 가지 방식으로 구분할 수 있는데[1, 2, 4], 이들은 모두 시스템의 입력과 출력을 이용하여 대상 시스템을 감시한다는 공통점을 가지고 있지만 이론적인 배경과 구현에 있어서는 차이를 보인다.

본 논문에서는 이들 네 가지 방식을 중심으로 모델 기반 FDI 기법의 기본 개념과 현재까지의 연구 결과를 소개한다. 관측기 방식과 검출필터 방식은 모두 관측기 이론을 응용하지만 전자는 일반적인 관측기를 여러 개를 동시에 사용함으로써 고장 분리를 구현하는 반면에[1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13], 후자는 고장에 대한 반응에 특정한 방향 조건을 추가한 하나의 관측기만을 사용하여 고장 분리를 구현한다는 점에서 차이가 있다[14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24]. 패리티 공간 방식은 위의 두 방식과는 달리 시스템의 상태변수를 추정하는 과정을 사용하지 않고 입력과 출력만을 이용하여 시스템의 항상성(consistency)을 확인할 수 있다는 특징이 있다. 여기서는 고장이 발생하지 않았을 때의 시스템의 상태를 확인하기 위해 입력과 출력 사이의 패리티 관계를 정의하고 이 관계의 성립 여부에 따라 고장을 검출한다[10, 25, 26, 27, 28]. 파라메터 추정 방식에서는 고장이 시스템에 포함된 파라메터에 반영된다는 사실을 이용하여 시스템의 입력과 출력을 이용하여 대상 시스템의 파라메터를 추정하여 정상적인 값과 비교한 후 고장 여부를 확인한다[1, 2, 3, 29].

이들 방식은 관측기나 파라메터 추정 이론을 이용하여 고장의 검출과 분리를 위해 추가적인 기능을 부여하므로 이러한 점을 중점적으로 살펴본다. 또한 모델 기반 FDI 기법을 실제로 적용하는데 있어 문제가 될 수 있는 시스템 모델링 오차나 외란, 잡음 등과 같은 미지입력(unknown input)에 대한 견실성(robustness)을 확보하는 방법과 각 방식의 장단점을 기술한다.

국내의 모델 기반 FDI 분야를 살펴보기 위해 1980년 이후의 국내 학술지에 발표된 총 9편의 논문을 소개하였다. 각 논문들은 기존 이론의 단점을 보완하거나 개념을 확장한 것이며 미지입력에 대한 견실성 문제를 해결하기 위한 방안을 제시하고 있다.



고장검출 전달 및 고장회복 제어

본 논문의 구조는 다음과 같다. 2절에서는 모델 기반 FDI 기법의 이론을 전개할 때 사용될 시스템의 모델을 제시한다. 3절에서는 모델 기반 FDI 기법의 네 가지 방식인 관측기 방식, 검출필터 방식, 패리티 공간 방식, 파라메터 추정 방식 등의 구현 방법과 미지입력에 대한 견실성을 확보하기 위한 방법을 살펴본다. 4절에서는 국내 학술지를 중심으로 관련된 국내의 연구 결과를 정리한다.

2. 시스템 모델

모델 기반 FDI 기법에서 사용하게 될 모델에 대해서 알아보기로 한다. 시스템의 모델은 시간 영역 상에서 연속시간 시스템과 이산시간 시스템으로 나누어 볼 수 있다. 연속시간 시스템에 대해서는 다음과 같은 형태를 사용하기로 한다.

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) + Ed(t) + Fn(t) \\ y(t) &= Cx(t) \end{aligned} \quad (2.1)$$

여기서 $x(t)$ 는 n 차의 상태벡터, $u(t)$ 는 p 차의 입력벡터, $y(t)$ 는 q 차의 출력벡터이다. 행렬 A, B, C 는 벡터의 크기에 대한 적당한 크기의 행렬이다. $Fn(t)$ 는 고장에 대한 모델이며 F 는 고장이 시스템에 포함되는 방향을 나타내는 행렬이다. 또한 $n(t)$ 는 고장의 시간에 따른 변화를 나타내는 r 차의 벡터로서 이 값이 일정 이상 커지면 고장이 발생한 것으로 간주한다. 이 때 F 는 시스템 요소(component) 이상의 경우에 A 의 열벡터들 중의 일부분, 구동기(actuator) 이상의 경우에 B 의 열벡터 중의 일부분으로 구성된다. $Ed(t)$ 는 모델링 오차, 외란, 잡음 등 시스템의 부정확성을 유발하는 요인을 나타낸 것으로 일반적으로는 미지입력이라고 정의한다. E 는 이들이 포함되는 방향을 의미하며 모델링 과정에서 알 수 있다고 가정하며 $d(t)$ 는 이들의 시간에 따른 변화를 나타내는 v 차의 벡터이다.

이산시간 시스템은 주로 연속시간 시스템을 일정한 주기로 샘플링한 결과로서 얻어지며 다음과 같이 나타낸다.

$$\begin{aligned} x(k+1) &= Ax(k) + Bu(k) + Ed(k) + Fn(k) \\ y(k) &= Cx(k) \end{aligned} \quad (2.2)$$

이 식에 포함된 기호는 (2.1)식과 동일한 의미를 가지며 미분 방정식(differential equation) 형태에서 차분 방정식(difference equation)의 형태로 바뀌었다는 점에서 차이가 있다.

앞서 언급한 시스템 요소(component) 고장과 구동기(actuator) 고장 이외에도 센서 고장이 있는데 이는 C 의 변형으로 간주되며 (2.1)식에서 $y(t)$ 항에 고장신호의 입력방향을 결정하는 행렬과 시간의 함수로 나타내어지는 벡터를 이용하여 나타낼 수 있다. 그러나 이들은 적당한 과정을 통해 (2.1), (2.2)식과 같이 변환할 수 있으므로 본 논문에서는 이를 모델만을 사용하기로 한다[3, 18].

위와 같은 상태 방정식 형태의 모델과 함께 다음과 같은 입력과 출력간의 미분 방정식 형태의 모델을 사용하기도 한다.

$$\begin{aligned} y^{(n)}(t) + (a_1 - a_{1F})y^{(n-1)}(t) + \cdots + (a_n - a_{nF})y(t) \\ = (b_0 - b_{0F})u^{(m)}(t) + \cdots + (b_m - b_{mF})u(t) \end{aligned} \quad (2.3)$$

여기서 $y(t)$ 는 시스템의 출력, $u(t)$ 는 시스템의 입력이며 위첨자는 미분을 표시한다. 이 때 a_i, b_i 가 정상적인 파라메터이고 a_{if} 와 b_{if} 는 각각 파라메터가 정상적인 값에서 벗어난 정도를 의미하며 이 값이 일정 이상 커지면 고장으로 간주한다.

3. 모델 기반 FDI 기법의 구현 방식

모델 기반 FDI 기법은 잔차를 생성하는 방식에 따라 다음과 같이 네 가지의 방식으로 구분한다[1, 2].

- 관측기(observer) 방식
- 검출필터(detection filter) 방식
- 패리티 공간(parity space) 방식
- 파라메터 추정(parameter estimation) 방식

이 중에서 관측기 방식, 검출필터 방식, 패리티 공간 방식은 고장을 시스템에 부가적으로 영향을 주는 입력으로 간주하여 이론을 전개하는 반면 파라메터 추정 방식은 고장을 파라메터의 변화에 의한 것으로 간주한다는 점에서 차이가 있다. 본 절에서는 각 방식들의 이론적 배경을 위와 같은 순서에 따라 소개하고 미지입력에 대한 영향에 대한 견실성을 유지할 수 있는 방법을 알아본다. 또한 각 방식의 특징을 살펴보고 그에 따른 장단점을 분석한다.

3.1. 관측기 방식

관측기 방식은 일반 관측기를 이용하여 시스템의 상태변수를 추정하는 과정에서 나타나는 고장의 영향을 통해 고장을 검출하는 방식으로 Clark, Willsky 등에 의해 제안되었으며 FDI 관련 연구 중에서 가장 많은 결과가 발표되고 있는 방식이기도 하다. 이 방식은 단일 혹은 다중의 Luenberger 관측기나 칼만 필터를 이용하여 대상 시스템의 입력과 출력을 이용하여 시스템의 상태변수를 추정하고 이를 이용하여 얻어진 예상되는 시스템의 출력과 실제 출력을 비교할 때 나타나는 잔차를 이용하여 고장을 검출한다.

이에 대한 연구 결과는 다음과 같다. Clark[7]은 Luenberger 관측기와 로직 회로를 포함하는 전용 관측기 방식을 제시하여 고장을 검출하는 문제를 다루었다. 이전의 연구 결과에서는 하드웨어 중복 개념에 따라 여러 세트의 센서를 이용하여 센서의 고장을 검출한 것에 비해, 이 논문에서는 해석적 중복 개념에 따라 한 세트의 센서만으로 센서 고장을 검출하는 방법을 제안하였다. 이어서 전용 관측기 방식을 단순화하여 여러 개 또는 하나의 관측기를 이용하는 방법으로 나누어 정리하였다. 또한 물리적 파라메터의 불확실성에 대해 견실성을 보장하는 방법에 대해 언급하였다[5, 6]. Frank[8]는 여러 개의 Luenberger 관측기를 이용하여 센서 고장을 검출하는 방법 중에서 파라메터 변화에 대해서는 민감하지 않고 센서 고장에만 민감한 관측기를 설계하는 방법을 제시하였다.

Saif[30]는 플랜트의 파라메터 변화와 불확실성이 존재하

【 모델 기반의 고장 검출 기법에 관한 고찰 】

는 경우를 가정한 선형 시스템에 대해 센서 고장 검출 및 확인을 위해 측정 불가능한 상태변수를 추정하는 견실 관측기를 제시하였으며, Basseville[31]은 선형 시스템에 대해서 잔차를 생성하는데 있어 deterministic 방법과 stochastic 방법을 비교하여, 오프라인(off-line) FDI에 대한 이 두 방법에서 잔차 생성은 가우시안 벡터의 선형변환을 설계하는 문제로 생각할 수 있음을 보였다.

지금부터는 일반적인 관측기를 사용하여 잔차를 구성하는 과정을 알아보고 관측기 이론 중의 하나인 미지입력 관측기를 이용하여 견실성을 확보하는 방법을 살펴본다. 관측기 방식과 관련된 이론 중에서 전반적인 내용을 다루고 있는 참고문헌 [1, 4]의 내용을 중심으로 하여 소개한다. 마지막으로 관측기 방식이 갖는 특징과 장단점을 분석하도록 한다.

3.1.1. 구현 방법

이 방식은 일반적인 관측기 이론을 그대로 사용하며 연속 시간 시스템이나 이산시간 시스템에 대해서 모두 적용할 수 있다. 일반적으로 잡음을 고려하지 않으면 Luenberger 관측기를 사용하며, 잡음이 고려된 경우에는 칼만 필터를 사용한다.

잔차원 관측기를 고려하여 잔차를 생성하는 과정을 알아보자. 관측기는 다음과 같은 형태로 주어진다.

$$\begin{aligned}\hat{x}(t) &= A\hat{x}(t) + Bu(t) + D(y(t) - C\hat{x}(t)) \\ \hat{y}(t) &= C\hat{x}(t)\end{aligned}\quad (3.1)$$

여기서 $\hat{x}(t)$ 는 추정된 상태변수이며 $\hat{y}(t)$ 가 추정된 시스템의 출력이다. D 와 관련된 항이 추정된 결과에서 발생한 오차를 보정하기 위한 항이며, D 는 관측기의 이득행렬이다.

(2.1)식으로 주어진 모델과 (3.1)식에 주어진 관측기에 대해서 추정오차를 다음과 같이 정의하면

$$\varepsilon(t) = x(t) - \hat{x}(t) \quad (3.2)$$

추정오차에 대한 식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}\dot{\varepsilon}(t) &= (A - DC)\varepsilon(t) + Ed(t) + Fn(t) \\ r(t) &= C\varepsilon(t)\end{aligned}\quad (3.3)$$

여기서 $r(t)$ 가 잔차로서 $r(t) = y(t) - \hat{y}(t)$ 로 정의된다. 이 때 미지입력인 $Ed(t)$ 와 고장신호인 $Fn(t)$ 가 모두 0인 상태에서 충분한 시간이 흐르면 $\varepsilon(t)$ 가 0이 되므로 실제 시스템의 상태변수를 정확히 추정하고 $r(t)$ 역시 0이 된다. 그러나 $Ed(t)$ 혹은 $Fn(t)$ 가 0이 아닌 값을 가지면 추정오차에 일정한 오차가 유지되며 이는 잔차에도 반영되므로 시스템에 고장이 발생했는지를 판정할 수 있다.

고장 검출뿐만 아니라 고장 분리를 위한 정보를 얻기 위해서 여러 개의 관측기를 동시에 구동하는 방법이 제안되었다[3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10]. 특히 센서 고장을 판별하기 위해 각 센서에 그 센서의 출력만으로 구동되는 관측기를 부착하여 전체의 출력을 추정하고 이 정보를 종합하는 방식을 전용 관측기(dedicated observer) 방식이라고 하며 Clark에 의해 제안되었다[5, 6, 7]. 예를 들어 첫 번째 출력인 $y_1(t)$ 만을 이용하여 관측기를 구동한다고 가정하면 다음과 같은 식을 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned}\dot{\hat{x}}^1(t) &= A\hat{x}^1(t) + Bu(t) + d_1(y_1(t) - c_1\hat{x}^1(t)) \\ \hat{y}^1(t) &= C\hat{x}^1(t)\end{aligned}\quad (3.5)$$

여기서 c_1 은 C 의 첫 번째 행벡터이며 d_1 는 첫 번째 관측기에 해당하는 이득행렬이다. 위첨자는 첫 번째 관측기에 해당하는 것임을 의미한다.

만일 첫 번째 센서에 고장이 발생하면 이 관측기는 (3.5)식에서 d_1 을 통해 $(y_1(t) - C\hat{x}^1(t))$ 가 0이 될 수 있도록 동작하기 때문에 $(y(t) - C\hat{x}^1(t))$ 의 첫 번째 원소만 0이 되고 나머지의 원소는 일정한 오차를 갖는다. 그리고 첫 번째 센서를 제외한 나머지 센서에 고장이 발생하면 $(y(t) - C\hat{x}^1(t))$ 에서 고장이 발생한 센서에 해당하는 잔차의 위치에 0이 아닌 값이 나타난다. 이러한 원리를 응용하여 각 센서에 대해서 각 센서의 출력으로만 구동되는 관측기를 부착하면 동시에 여러 개의 센서에 고장이 발생했을 경우에도 잔차의 크기를 통해서 어느 센서에 고장이 발생했는지 파악할 수 있다.

또 하나의 방식은 Frank에 의해 제안된 것으로 전용 관측기 방식과 동일한 수의 관측기를 사용하되 각 센서에 부착한 관측기는 해당하는 센서 이외의 모든 센서 출력을 사용하여 관측기를 구동한다. 이를 일반화된 관측기(generalized observer) 방식이라고 한다[1, 3]. 이 방식을 사용하면 동시에 두 개 이상의 센서에 고장이 발생했을 때 모든 관측기의 잔차가 0이 아닌 값을 갖기 때문에 이를 검출할 수 없으므로 고장 분리 성능이 전용 관측기 방식보다 떨어진다. 그러나 관측기를 구동하는데 사용되는 센서의 출력이 증가하므로 관측기 설계의 자유도가 증가한다는 장점이 있다.

관측기 방식에서 미지입력에 대한 영향을 제거할 수 있는 효과적인 방법으로 미지입력 관측기를 사용하는 것을 들 수 있는데 지금부터는 이를 이용하여 견실한 FDI 시스템을 구성하는 방법을 알아본다. 미지입력 관측기는 다음과 같은 형태로 구성된다[1, 3, 4].

$$\begin{aligned}\dot{z}(t) &= Pz(t) + Ju(t) + Gy(t) \\ r(t) &= L_1z(t) + L_2y(t)\end{aligned}\quad (3.6)$$

여기서 $z(t)$ 는 관측기의 상태변수로서 $x(t)$ 보다 작은 차원의 벡터이고, $r(t)$ 는 잔차이다. $u(t)$, $y(t)$ 는 각각 (2.1)식의 시스템 모델에서의 입력과 출력에 해당한다. 이 식에 사용된 행렬의 크기는 곱해진 벡터의 크기를 고려하면 적절하게 정해진다. 이 때 추정오차를 $\varepsilon(t) = z(t) - Tx(t)$ 로 정의하고 이에 대한 동적 방정식을 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}\dot{\varepsilon}(t) &= Pe(t) + (GC - TA)x(t) + (J - TB)u(t) \\ &\quad - TEd(t) - TFn(t)\end{aligned}\quad (3.7)$$

$$r(t) = L_1(\varepsilon(t) + Tx(t)) + L_2Cx(t)$$

이 때 다음과 같은 조건을 만족하도록 미지수인 T , P , J , L_1 , L_2 를 선정한다.

$$TA - PT = GC, \quad J = TB, \quad L_1T + L_2C = 0 \quad (3.8)$$

이 조건을 (3.7)식에 대입하면 추정오차의 방정식이 다음과 같이 간단하게 정리된다.

$$\begin{aligned}\dot{\varepsilon}(t) &= Pe(t) - TEd(t) - TFn(t) \\ r(t) &= L_1\varepsilon(t)\end{aligned}\quad (3.9)$$



고장검출 진단 및 고장회용 제어

이 식에서 우선적으로 만족되어야 할 사항으로는 미지입력 $Ed(t)$ 과 고장신호 $Fn(t)$ 를 제외했을 때 추정오차가 근사적으로 0이 되어야 한다는 것이다. 따라서 P 의 모든 고유치의 실수부가 음수가 되어야 하며 (3.8)식의 해를 구하는 데 있어 우선적으로 P 는 이 조건을 만족시킬도록 선정된다. (3.9)식을 보면 추정오차에 있어서 미지입력과 고장신호의 영향이 존재하며 이로 인해 잔차에도 이들 영향이 나타난다. 우선 미지입력에 대한 영향을 완전히 제거하려면 다음과 같은 조건을 만족시켜야 한다.

$$TE = 0 \quad (3.10)$$

또한 고장 검출의 정확성을 위해서는 상태변화가 수행된 후에도 고장신호에 대한 영향이 잔차에 포함되어야 한다. 이 조건을 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\text{rank}(TF) = \text{rank}(F) \quad (3.11)$$

(3.8), (3.10), (3.11)식을 동시에 만족하는 T , P , J , L_1 , L_2 을 구하면 미지입력의 영향은 제거되고 다음과 같이 고장이 발생할 때 잔차가 0이 아닌 값을 갖는 관측기를 설계할 수 있다.

$$\begin{aligned} n(t) = 0 &\rightarrow r(t) = 0 \quad (t \rightarrow \infty) \\ n(t) \neq 0 &\rightarrow r(t) \neq 0 \end{aligned} \quad (3.12)$$

지금까지 소개한 미지입력 관측기를 이용하면 미지입력에 대한 견실성을 향상시킬 수 있으며 잔차 생성에 있어 고장 분리를 포함시킬 수 있다. 기본 개념은 전용 관측기 방식이나 일반화된 관측기 방식과 마찬가지로 여러 개의 미지입력 관측기를 동시에 구동하며 각각의 관측기는 특정한 고장에 대해서만 반응하도록 설정하는 것이다[1, 8].

편의를 위해 F 를 다음과 같이 열벡터들로 나타내기로 한다.

$$F = [f_1 \ f_2 \ \cdots \ f_r] \quad (3.13)$$

첫 번째 관측기는 f_1 을 미지입력으로 간주하여 설계한다. 즉, (3.9)식에서의 미지입력과 고장신호에 대한 행렬을 다음과 같이 변형한다.

$$\hat{F} = [f_2 \ f_3 \ \cdots \ f_r], \quad \hat{E} = [E \ | \ f_1] \quad (3.14)$$

이렇게 하면 첫 번째 관측기에는 f_1 과 관련된 고장신호를 미지입력으로 고려했기 때문에 잔차에는 f_1 과 관련된 고장 신호의 영향이 나타나지 않는다. 이와 같은 작업을 나머지 관측기에게 대해서도 동일하게 적용하도록 한다[1, 3].

$$\begin{aligned} r_1(t) &= \text{UIO}_1(f_2, f_3, \dots, f_r) \\ r_2(t) &= \text{UIO}_2(f_1, f_3, \dots, f_r) \\ &\vdots \\ r_r(t) &= \text{UIO}_r(f_1, f_2, \dots, f_{r-1}) \end{aligned} \quad (3.15)$$

여기서 $\text{UIO}(\cdot)$ 는 (3.6)에서 (3.14)식까지의 과정을 거쳐 설계한 미지입력 관측기를 의미하고 $r_1(t), \dots, r_r(t)$ 는 잔차를 의미한다. $\text{UIO}(\cdot)$ 의 괄호 안은 벡터들은 각 미지입력 관측기가 영향을 받을 고장신호를 의미한다. 식을 보면 i 번째 관측기에는 f_i 와 관련된 고장을 미지입력으로 간주하여 그 영향력을 제거한 것을 볼 수 있다. 따라서 첫 번째 고장, 즉 f_1 과 관련된 고장이 발생하면 첫 번째 관측기를 제외한 나머지 관측기에게만 그 영향이 나타나기 때문에 이를 쉽게

판별할 수 있다. 그러나 f_1 과 f_2 와 관련된 고장이 동시에 발생한 경우와 f_1 과 f_3 에 관련된 고장이 동시에 발생한 경우는 동일하게 모든 잔차가 0이 아닌 값을 갖기 때문에 두 경우를 구별하는데 어려움이 있다.

따라서 동시에 발생하는 두 개 이상의 고장을 분리하기 위해서 다음과 같은 구조를 사용한다[1, 3, 4].

$$\begin{aligned} r_1(t) &= \text{UIO}_1(f_1) \\ r_2(t) &= \text{UIO}_2(f_2) \\ &\vdots \\ r_r(t) &= \text{UIO}_r(f_r) \end{aligned} \quad (3.16)$$

이렇게 하면 각 잔차는 관련된 고장에 대해서만 반응하기 때문에 여러 종류의 고장이 동시에 발생하더라도 쉽게 구별할 수 있다. 그러나 이 구조에서는 해당되는 고장신호를 제외한 모든 고장신호를 미지입력으로 간주해야 하므로 각 관측기에 포함시킬 수 있는 미지입력의 수가 줄어 견실성이 떨어진다는 단점이 있다.

3.1.2. 특징

전용 관측기 방식에서는 각 센서에 대해서 그 센서의 출력으로만 구동되는 관측기를 부착해야 하는데 이 때 관측기와 관련된 시스템이 가관측하지 않으면 사용할 수 없다[5, 6, 7]. 일반화된 관측기 방식에서는 각 관측기를 해당 센서를 제외한 나머지 센서의 출력으로 구동하여 가관측성의 문제를 완화시키는 방식을 제안했으나 전용 관측기 방식과는 달리 동시에 여러 개의 고장이 발생했을 때는 분리 성능이 떨어지는 단점이 있다. 이는 미지입력 관측기를 사용한 경우에도 동일하게 적용될 수 있다. 또한 고장 발생을 모니터링하고자 하는 기기의 개수에 해당하는 관측기를 동시에 구동하기 때문에 관측기의 개수가 다른 방식에 비해 많이 필요하며 이로 인한 계산량의 증가가 문제가 될 수 있다.

그러나 기존의 관측기 이론을 그대로 적용하여 FDI 시스템을 구성할 수 있으며 관측기의 설계에 관한 이론이 연속시간이나 이산시간 시스템 모두에 대해서 잘 정리되어 있으므로 모델의 형태에 큰 영향을 받지 않는다. 또한 미지입력 관측기를 사용하면 모델링된 오차 요인에 대해 견실한 성질을 갖는 시스템을 구성할 수 있으며 칼만 필터를 사용하면 잡음에 대한 영향을 최소화할 수 있는 최적의 관측기를 사용할 수 있으므로 미지입력에 대한 견실성을 향상시킬 수 있다.

3.2. 검출필터 방식

검출필터 방식은 고장에 대한 잔차의 출력이 특정한 방향성을 갖도록 설정한 관측기를 이용하여 고장을 검출하는 방식으로 Beard에 의해 제안되었다. 검출필터는 일반적인 전자원 관측기와 동일한 형태를 가지며 이득행렬을 선정하는데 있어서 고장에 대한 잔차의 출력이 특정한 방향성을 갖도록 설정하여 고장 검출과 분리를 동시에 수행할 수 있도록 한다.

이에 대한 연구 결과는 다음과 같다. Beard[14]는 검출필터의 가장 기본적인 개념인 검출공간에 대한 정의를 제시하고 특정한 조건을 만족시키는 순환생성자인 검출생성자를 제안하여 검출공간에 해당하는 고유치를 지정하는 방법을

【 모델 기반의 고장 검출 기법에 관한 고찰 】

제안하였으며, Jones[32]는 벡터 공간 개념을 이용하여 검출 필터 이론을 확장하고 검출필터를 구성하고 남은 자유도를 이용하여 잡음에 대한 견실성을 구현하기 위한 방안을 제안하였다. Massoumnia[15]는 검출필터는 선형 시스템의 기하학적 접근(geometric approach) 방법을 사용하여 새롭게 해석하고 다중 고장에 대한 검출공간의 성질을 고려하여 새로운 설계 방법을 제안하였다.

White[16]는 검출공간을 특정한 조건을 만족시키는 고장을 나타내는 벡터와 선형성을 갖는 벡터들로 이루어지는 공간으로 해석하고 고유구조 지정 방식을 이용하여 다중 고장에 대해 검출필터를 설계할 수 있는 방법을 제안하였다. Park[19]은 검출공간을 고장이 입력되는 방향을 고유벡터로 지정하였을 때 고정되는 공간으로 정의하고, 검출필터를 설계하는 방법을 closed-form으로 제안하였다. 이를 바탕으로 검출필터를 설계하는데 남는 자유도를 활용하여 잡음에 견실한 최적 검출필터를 설계할 수 있는 방법을 제안하였다 [20]. 최근에 Chung[23]의 결과는 미지입력에 대한 영향을 줄이고 고장에 대한 검출 성능을 높이기 위해 게임 이론(game theory)을 이용한 최적화 과정을 통해 검출필터를 설계할 수 있는 방식을 제안한 바 있다. 이들 결과는 공통적으로 고장의 시간에 따른 변화에 관계없이 시스템에 포함된 고장이 진행해 나가는 방향에만 관심을 갖고 관측기의 잔차가 고장에 대해서 일정한 방향의 반응을 보이도록 검출필터의 이득을 선정하는 문제를 다룬다.

지금부터는 검출필터의 이론을 소개하고 그 특징을 알아본다. 검출필터의 이론 중에서 고유구조를 이용하여 해석한 참고문헌 [16]의 내용을 주로 인용하기로 한다.

3.2.1. 구현 방법

검출필터는 (2.1)식과 같은 연속시간 시스템을 기본으로 전개되며 미지입력의 영향은 존재하지 않는 것으로 가정하고 출발한다. 따라서 $Ed(t)$ 는 제외하고 고장과 관련된 $Fn(t)$ 만을 시스템에 포함시키기로 한다.

이러한 가정 하에서 검출필터는 다음과 같은 식으로 주어진다.

$$\begin{aligned}\hat{x}(t) &= A\hat{x}(t) + Bu(t) + D(y(t) - C\hat{x}(t)) \\ \hat{y}(t) &= C\hat{x}(t)\end{aligned}\quad (3.17)$$

여기서 $\hat{x}(t)$ 는 검출필터의 상태변수이며 실제 시스템의 상태 변수와 같은 크기의 벡터이다. D 는 이득행렬로서 검출이득이라고 정의한다. 이미 설명한 관측기 방식에서와 같이 추정 오차를 $\epsilon(t) = x(t) - \hat{x}(t)$ 로 정의하면 이에 대한 식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}\dot{\epsilon}(t) &= (A - DC)\epsilon(t) + Fn(t) \\ r(t) &= C\epsilon(t)\end{aligned}\quad (3.18)$$

검출필터와 관련된 논문에서는 $\epsilon(t)$ 를 잔차, $r(t)$ 를 잔차 출력이라고 하는데 여기서는 다른 부분과의 연속성을 위해 $r(t)$ 를 잔차로 정의하기로 한다. 이 식은 이미 관측기 방식에서 사용한 (3.3)식 중에서 $Ed(t)$ 항이 제외된 것과 동일한 형태이다. 그러나 검출필터가 일반적인 관측기와 다른 점은 이득행렬 D 를 선정하는데 있어 고장신호에 의한 잔차의

방향이 특정한 방향을 유지하도록 한다는 점이다. 즉, (3.18)식과 같이 고장신호의 방향을 나타내는 행렬 F 중에서 첫 번째 열벡터인 f_1 만을 고려할 때 잔차에 대한 시스템의 반응속도를 결정하는 $(A - DC)$ 의 고유치를 임의로 선정하면서 동시에 f_1 에 대한 잔차의 출력의 방향을 Cf_1 으로 고정시킨다. 이러한 방식으로 나머지 고장에 대해서도 특정한 방향을 지정하여 이 방향으로 움직이는 잔차를 통해서 고장의 검출뿐만 아니라 분리를 수행할 수 있다. F 의 각 열벡터와 관련된 고장신호에 대해서 잔차의 반응 방향은 다음과 같다 [14, 15, 16, 17, 20].

$$\{Cf_1, Cf_2, \dots, Cf_r\} \quad (3.19)$$

검출필터가 갖는 방향성을 만족하기 위해서는 고장신호에 의한 추정오차의 반응을 일정한 공간으로 제한시킬 필요가 있다. 이를 $(A - DC)$ 의 고유벡터를 이용하여 기술할 수 있다 [16].

$$\begin{aligned}(A - DC)v_j^i &= \lambda_j^i v_j^i, \quad j = 1, \dots, \nu_i \\ f_i &= \sum_{j=1}^{\nu_i} a_j^i v_j^i\end{aligned}\quad (3.20)$$

여기서 a_j^i 는 적당한 상수이며 v_j^i 는 우고유벡터를 나타낸다.

첫 번째 식은 λ_j^i 에 대한 고유벡터를 v_j^i 로 지정했음을 의미하며 두 번째 식은 f_i 에 해당하는 고장에 대한 고유벡터의 반응을 ν_i 개의 고유벡터로 구성되는 공간에 제한한다는 의미를 가지고 있다. 여기서 ν_i 개의 고유벡터인 v_j^i 로 이루어지는 공간을 검출공간(detection space)라고 정의하며 이 공간의 크기인 ν_i 를 검출차수(detection order)라고 한다 [14, 15, 16, 17, 20].

검출필터의 반응 특성을 알아보기 위해 초기조건을 제외하고 첫 번째 고장신호로부터 잔차까지의 반응을 고려하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}q(t) &= C \int_0^t \left(\sum_{i=1}^{\nu_i} \sum_{j=1}^{\nu_i} e^{\lambda_j^i(t-\tau)} v_j^i w_j^{iT} \right) f_1 n_1(\tau) d\tau \\ &= C \int_0^t \left(\sum_{i=1}^{\nu_i} e^{\lambda_j^i(t-\tau)} v_j^i w_j^{iT} \right) \left(\sum_{j=1}^{\nu_i} a_j^i v_j^i \right) n_1(\tau) d\tau\end{aligned}\quad (3.21)$$

여기서 w_j^i 는 λ_j^i 에 대한 좌고유벡터이며 $n_1(t)$ 는 $n(t)$ 의 첫 번째 원소를 의미한다. 그런데 좌고유벡터와 우고유벡터 사이에는 다음과 같은 직교성(orthogonality)이 존재하기 때문에

$$w_j^T v_i \neq 0 \quad (i=j), \quad w_j^T v_i = 0 \quad (i \neq j) \quad (3.22)$$

(3.21)식의 반응은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$q(t) = C \int_0^t \left(\sum_{j=1}^{\nu_i} e^{\lambda_j^i(t-\tau)} a_j^i v_j^i n_1(\tau) \right) d\tau \quad (3.23)$$

이 때 f_1 와 관련된 고유벡터에 대해 다음과 같은 방향성을 설정하면

$$Cf_1 = \beta_1^i C v_1^i, \quad j = 1, \dots, \nu_1 \quad (3.24)$$

최종적인 잔차의 반응은 다음과 같다.

$$q(t) = C f_1 \int_0^t \left(\sum_{j=1}^{\nu_i} \alpha_j^i \beta_j^i e^{\lambda_j^i(t-\tau)} n_1(\tau) \right) d\tau \quad (3.25)$$

여기서 β_j^i 은 적당한 실수이다. 이 때 적분 결과는 스칼라 이므로 잔차의 반응은 Cf_1 으로 정의되는 방향으로만 움직



고장검출 전달 및 고장회용 제어

이는 것을 볼 수 있다.

나머지 $(r-1)$ 개의 고장에 대해서 (3.20)식과 같이 고유벡터를 지정하면서 서로 다른 고장에 대해서 동일한 고유벡터를 지정하지 않는다면 각 고장에 대한 반응이 (3.19)식에서 정의한 방향으로 제한된다. 이제 (3.20)식과 (3.24)식의 조건을 하나의 행렬식으로 합치면 다음과 같다[16].

$$\begin{bmatrix} \lambda_j^i I - A & D \\ C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_j^i \\ Cf_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ Cf_i \end{bmatrix}, \quad j=1, \dots, \nu_i, \quad i=1, \dots, r, \quad (3.26)$$

여기서 고유벡터에 대한 방향성을 $Cf_i = Cv_i^i$ 로 설정한 것을 볼 수 있다.

C 의 열의 수인 q 와 고장의 수인 r 이 같고, 모든 고장이 상호검출가능하면 (mutually detectable) 각 고유벡터 및 행렬 원소에 대한 일차 연립방정식을 구할 수 있으며 미지수의 개수와 식의 개수가 동일하게 주어지기 때문에 검출필터를 설계할 수 있다. 이 때 상호검출가능성(mutual detectability)은 고장에 대한 추정오차의 반응이 나타나는 공간이 다른 고장에 대한 공간과 겹치지 않는데 필요한 자유도가 보장됨을 의미하며 이 조건이 만족되지 않으면 필터의 차수는 유지하면서 고장 중에 몇 개를 제외시킴으로써 늘어나는 자유도를 이용하거나 시스템을 확장하여 추가적인 자유도를 획득하는 방법을 사용한다[14, 16].

검출필터에서도 미지입력에 대한 견실성을 향상시킬 수 있는데 이미 설명한 미지입력 관측기와 비슷한 방식을 취한다. 즉, 미지입력이 시스템에 포함되는 방향을 벡터의 형태로 모델링한 후 이를 추가적인 고장으로 간주한다. 이미 언급한 바와 같이 검출필터를 설계하면 각 고장에 대한 추정오차의 반응이 정해진 공간에만 한정되기 때문에 미지입력에 대한 반응이 검출하고자 하는 고장에 대한 반응에 영향을 주지 못하므로 견실한 검출필터를 설계할 수 있다. 이를 구현하는 방법은 주어진 고장신호에 대한 검출필터 설계와 동일한 과정을 거치므로 자세한 설명은 생략하도록 한다.

3.2.2. 특징

검출필터를 앞에서 기술한 형태의 관측기와 비교했을 때 나타나는 가장 큰 특징은 하나의 관측기를 이용하여 동시에 여러 개의 고장을 구별할 수 있다는 것이다. 이는 전체 공간을 각각의 고장벡터에 해당하는 독립적인 검출공간으로 구분하여 할당하기 때문이며 하나의 검출공간은 해당하는 고장에 대해서만 반응하므로 다른 고장에 대해서는 독립적으로 작용한다.

이론 전개 과정에서 포함되지 않은 미지입력에 대한 견실성을 확보하기 위한 방법으로 특정한 입력방향을 갖는 미지입력에 대해서는 미지입력을 하나의 고장으로 간주하여 검출공간을 할당한 후 잔차에서 이 영향을 제거하는 방법[24]과, 방향성이 없는 잡음에 대해서는 검출공간을 구성하고 남은 자유도를 활용하는 방법[20, 24] 등이 제안된 바 있는데 이에 대해서는 앞으로도 많은 연구가 필요하다. 또한 연속시간 시스템을 기본으로 하기 때문에 디지털 컴퓨터에 구현하는데 적합한 이산시간 시스템에 대해서는 적절한 이론의 확

장이 필요하다.

검출필터는 하나의 관측기를 이용하여 동시에 여러 개의 고장을 구별할 수 있기 때문에 고장 검출 및 분리를 위한 필터의 수가 대폭 줄어든다. 검출필터는 미지입력 관측기를 이용하여 (3.16)식에서 제안한 구조와 동일한 형태이나 (3.16)식의 구조는 하나의 고장에 대해 독립적인 관측기를 할당하는데 반해 검출필터는 관측기 반응의 일부분을 분할하여 하나의 고장에 할당하기 때문에 관측기의 수와 이에 따른 계산량의 이득을 볼 수 있다. 또한 각 고장에 대하여 검출필터는 단일 입출력 시스템으로 반응하기 때문에 한 방향으로 제한된 잔차를 통해 시간에 대한 고장 정보를 추정하기 쉽다는 장점이 있다[19].

3.3. 패리티 공간 방식

패리티 공간 방식은 시스템 모델과 대상 시스템의 동작의 유사성을 확인할 수 있는 패리티 벡터를 생성하고 시스템의 입력과 출력의 간단한 산술적 계산을 통해 잔차를 생성해내는 방식으로서 Chow와 Willsky에 의해 제안되었다. 미지입력 관측기나 검출필터 방식에서는 잔차를 생성하는데 있어 대상 시스템의 상태변수를 추정해야 하지만 이 방식은 입력과 출력만을 사용한다.

이에 대한 연구 결과는 다음과 같다. Chow[26]는 선형시스템에 대한 해석적 중복을 수학적으로 보이고 이를 Auto Regressive Moving Average (ARMA) 기법을 이용하여 해석하였다. 그리고 이 해석적 중복을 구성하는 방법과 모델의 영향과 잡음의 영향을 최소화할 수 있는 방법을 제안하였다. Lou[25]는 모델 기반 FDI 기법의 모델의 오차로 인한 오동작을 보완하기 위해 패리티 공간을 이용하여 중복성을 측정하는 방법을 제시하고 이를 통하여 최적 견실성의 개념을 도입하였다. Gertler[27]는 작은 크기의 고장에 대한 잔차의 영향을 최소화하여 오경보를 발생하는 것을 막기 위해서 특정 고장에 대해 잔차가 움직이는 방향이 수직이 될 수 있도록 만드는 패리티 관계식을 제시하였고, Patton[10]은 시스템의 모델링 오차, 각종 외란의 영향을 모두 고려하여 미지입력이 시스템에 포함되는 분포 행렬을 제안하고 잔차에 대한 이들의 영향을 최소화시킬 수 있도록 분포 행렬을 선정하는 문제를 다루었다.

지금부터는 참고문헌 [1, 3]의 내용을 중심으로 시스템의 입출력식을 이용하여 패리티 공간을 구성하는 방법을 살펴보고 패리티 벡터를 이용하여 잔차를 생성하는 과정과 미지입력에 대한 영향을 최소화하기 위한 방법을 알아본다. 또한 패리티 공간 방식이 갖는 특징과 이로 인한 장단점을 분석하도록 한다.

3.3.1. 구현 방법

패리티 공간 방식은 (2.2)식과 같은 이산시간 시스템을 기반으로 하여 기술된다. 이 때 현재의 출력 $y(k)$ 는 임의의 자연수 s 에 대해서 과거의 상태변수와 입력을 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

【 모델 기반의 고장 검출 기법에 관한 고찰 】

$$y(k) = CA^s x(k-s) + \sum_{i=1}^s CA^{i-1} Bu(k-i) + \sum_{i=1}^s CA^{i-1} Fn(k-i) \quad (3.27)$$

현재의 출력인 $y(k)$ 에서부터 $y(k-s)$ 까지의 출력을 모아 하나의 벡터로 구성하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} y(k-s) \\ y(k-s+1) \\ \vdots \\ y(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ \vdots \\ CA^s \end{bmatrix} x(k-s) + H_0 \begin{bmatrix} u(k-s) \\ u(k-s+1) \\ \vdots \\ u(k) \end{bmatrix} + H_1 \begin{bmatrix} n(k-s) \\ n(k-s+1) \\ \vdots \\ n(k) \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

여기서 사용된 행렬 H_0 과 H_1 은 다음과 같이 정의된다.

$$H_0 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \cdots & 0 \\ CB & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ CA^{s-1}B & CA^{s-2}B & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

$$H_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \cdots & 0 \\ CF & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ CA^{s-1}F & CA^{s-2}F & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

(3.28)식을 이용하여 시스템의 항상성을 검사하기 위한 패리티 관계식을 만들기 위해 다음의 조건을 만족시키는 공간 P 를 고려한다.

$$P = \left\{ v \mid v^T \begin{bmatrix} C \\ CA \\ \vdots \\ CA^s \end{bmatrix} = 0 \right\} \quad (3.31)$$

이 때 P 를 s 차의 패리티 공간(parity space)이라고 하며 이 공간의 임의의 벡터를 패리티 벡터라고 한다[1, 3]. 패리티 벡터 v 를 (3.28)식에 곱한 뒤 실제로 측정 가능한 신호인 $u(k)$ 와 $y(k)$ 와 관련된 항과 측정 가능하지 않은 신호인 $n(k)$ 와 관련된 항을 분리하여 정리하면 다음과 같다.

$$v^T \left(\begin{bmatrix} y(k-s) \\ y(k-s+1) \\ \vdots \\ y(k) \end{bmatrix} - H_0 \begin{bmatrix} u(k-s) \\ u(k-s+1) \\ \vdots \\ u(k) \end{bmatrix} \right) = v^T H_1 \begin{bmatrix} n(k-s) \\ n(k-s+1) \\ \vdots \\ n(k) \end{bmatrix} \quad (3.32)$$

고장에 대한 정보를 얻기 위해서는 다음의 조건을 만족시켜야 한다.

$$v^T H_1 \neq 0 \quad (3.33)$$

(3.32)식에서 왼쪽의 항을 잔차로서 사용하여 다음과 같이 정의한다.

$$r(k) = v^T \left(\begin{bmatrix} y(k-s) \\ y(k-s+1) \\ \vdots \\ y(k) \end{bmatrix} - H_0 \begin{bmatrix} u(k-s) \\ u(k-s+1) \\ \vdots \\ u(k) \end{bmatrix} \right) \quad (3.34)$$

이 식을 보면 잔차 $r(k)$ 에는 시스템의 상태변수인 $x(k)$ 가 포함되어 있지 않고 시스템의 모델과 입력, 출력만으로 이루어져 있는 것을 알 수 있다. 그리고 (3.32)식으로부터 $r(k)$ 는 고장이 발생하여 $n(k) \neq 0$ 이면 0이 아닌 값을 가지며 그 이외의 경우에는 0이 되므로 이를 이용하여 시스템의 고장 여부를 확인할 수 있다.

특히 (3.31)식에서 볼 수 있는 바와 같이 패리티 공간의 크기는 s 가 증가함에 따라 같이 증가하며 이로 인해 패리티 벡터를 선정할 수 있는 자유도가 증가하기 때문에 (3.34)식과 같은 고장 검출 이외에도 미지입력에 대한 견실성을 확보하는데 사용할 수 있다[1, 4].

미지입력의 영향을 고려하기 위해서는 다음과 같이 (2.2)식의 $Ed(k)$ 의 영향을 잔차에 포함시킬 수 있다.

$$r(k) = v^T \left(\begin{bmatrix} y(k-s) \\ y(k-s+1) \\ \vdots \\ y(k) \end{bmatrix} - H_0 \begin{bmatrix} u(k-s) \\ u(k-s+1) \\ \vdots \\ u(k) \end{bmatrix} - H_2 \begin{bmatrix} d(k-s) \\ d(k-s+1) \\ \vdots \\ d(k) \end{bmatrix} \right) \quad (3.35)$$

여기서 잔차에 대한 미지입력의 영향을 나타내는 행렬인 H_2 는 다음과 같이 주어진다.

$$H_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \cdots & 0 \\ CE & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ CA^{s-1}E & CA^{s-2}E & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad (3.36)$$

잔차에 나타나는 미지입력의 영향을 제거해야 하므로 패리티 벡터를 선정하는데 있어 추가적으로 다음과 같은 조건을 추가한다[1, 3].

$$v^T H_2 = 0 \quad (3.37)$$

지금까지의 패리티 벡터를 선정하는데 대한 조건을 다음과 같이 세 가지로 나누낼 수 있다.

$$v^T \begin{bmatrix} C \\ CA \\ \vdots \\ CA^s \end{bmatrix} = 0, \quad v^T H_1 \neq 0, \quad v^T H_2 = 0 \quad (3.38)$$

만일 이 세 가지 조건을 동시에 만족시키는 패리티 벡터 v 가 존재하지 않기 않는다면 (3.38)식에서 기본적인 패리티 관계식을 만들어내기 위한 조건인 첫 번째 조건은 만족시키면서 두 번째와 세 번째 조건을 근사적으로 만족시킬 수 있는 벡터를 선정해야 한다. 즉, 미지입력에 의한 영향을 최소화하고 고장에 의한 영향을 최대로 만들 수 있도록 선정한다. 이는 다음과 같은 비용함수를 최소화하는 문제로 생각할 수 있다[1, 3].

$$p(s) = \frac{\|v^T H_2\|_2}{\|v^T H_1\|_2} \quad (3.39)$$

여기서 $p(s)$ 도 비용함수로서 팔호 안은 이 값이 s 에 의존한다는 것을 나타내고, $\|\cdot\|_2$ 은 이차 노름을 의미한다. 이 때 v 는 (3.38)식의 첫 번째 조건을 만족시켜야 하기 때문에 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$p(s) = \frac{\|w^T V^T H_2\|_2}{\|w^T V^T H_1\|_2} \quad (3.40)$$

여기서 V 는 $[C^T (CA)^T \cdots (CA^s)^T]^T$ 의 좌측 영공간(left null space)의 기저를 모은 행렬이고 w 는 임의의 벡터이다.

(3.40)식이 최소화되기 위한 필요조건은 $p(s)$ 를 w 로 미분했을 때 0이 되는 것이다. 이 식이 양수인 점을 이용하여 위의 식을 제곱한 후 미분을 했을 때 0이 된다는 조건을 적용하면 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$w^T (V^T H_2 H_2^T V - p(s) V^T H_1 H_1^T V) = 0 \quad (3.41)$$

이 식에서 w 와 $p(s)$ 를 제외하면 알려진 행렬이기 때문에 이 문제는 일반화된 고유치와 고유벡터 문제로 변환시킬 수 있으며 $p(s)$ 가 고유치, w 가 고유벡터에 해당한다. 따라서 주어진 행렬에 대해서 가장 작은 고유치가 최소의 비용함수의 값이 되며 w 를 이용하여 Vw 를 계산하면 최적의 패리티 벡터를 얻을 수 있다.



3.3.2. 특징

페리티 공간 방식의 특징 중의 하나는 개루프(open-loop) 구조이기 때문에, 일정한 폭의 시간창을 통해서만 시스템에 발생한 고장을 확인할 수 있다는 점이다[16]. 잔차와 관련된 (3.32)식을 통해서 알 수 있듯이 잔차인 $r(k)$ 를 통해 나타나는 고장은 k 에서 $(k-s)$ 구간에 해당하는 것이며 그 이외의 시간에 대한 영향은 나타나지 않는다. 이는 페리티 관계식의 형태가 모든 극점이 0인 dead-beat 관측기의 일종이기 때문이다[1].

이와 같은 특징으로 인해 페리티 공간 방식에서는 고장에 대한 잔차의 반응 시간을 늘이기 위해서는 페리티 공간의 차수인 s 를 증가시켜 잔차에 고장신호가 포함되는 시간을 늘려야 한다. 또한 미지입력에 대한 견실성을 고려할 때에는 (3.39)식에서 정의된 비용함수를 최소화해야 하며 이 경우에도 s 가 클수록 유리하다. 그러나 s 를 증가시키는 것에는 상한이 존재하며 잔차를 계산하는 (3.32)식에서 행렬 H_0 의 크기가 커지므로 온라인 형태로 구현할 때의 계산량의 증가를 고려해야 한다[1, 3]. 이러한 특징은 관측기 방식이나 검출필터 방식에서는 관측기의 차수를 변화시키지 않고 관측기나 필터의 구조를 변경함으로써 고장에 대한 잔차의 반응시간을 변경하거나 미지입력에 대한 영향을 최소화시키는 것과 비교했을 때 단점으로 볼 수 있다.

그러나 (3.33)식에서 볼 수 있는 바와 같이 잔차와 고장신호의 시간에 따른 반응이 간단한 산술식의 형태를 띠기 때문에 직접적으로 고장신호의 형태를 파악하는데 유리하다는 장점이 있다. 즉, 이미 설명한 관측기를 이용한 방식에서는 고장에 대한 잔차의 반응이 관측기라는 필터를 통과한 형태이기 때문에 직접적인 형태를 알기 힘든 반면에 이 방식을 사용하면 (3.33)식에서 양변의 원쪽에 역행렬을 곱해서 고장신호의 시간에 따른 변화 양상을 파악할 수 있다[28].

3.4. 파라메터 추정 방식

파라메터 추정 방식은 시스템에 포함되어 있는 파라메터를 통해 고장이 반영된다는 가정 하에서 기존의 추정 기법을 사용하여 대상 시스템의 파라메터를 추정하고 이를 기대하는 값과 비교함으로써 고장을 검출하는 방식으로 Isermann에 의해 제안되었다. 대상 시스템의 파라메터에는 시스템의 각종 물리적인 상수가 포함되어 있기 때문에 추정된 파라메터를 이용하여 이를 계산한 뒤 정상적인 값과 비교한다[1, 2, 3].

이에 대한 연구 결과는 다음과 같다. Isermann[2]은 연속 시간 시스템에 대해 기본적인 파라메터 추정 방법을 제시하고 데이터 처리 및 고장 검출, 고장진단으로 이루어지는 3단계의 절차를 제안하였으며 Jiang[33]은 근궤적(root locus)로 표현되는 시스템에서 미리 계산된 특성값과 비교하고 패턴 인식 방법을 이용하여 고장을 분리하는 모드 파라메터 추정 방식을 제안하였다.

지금부터는 참고문헌 [1, 2]의 내용을 중심으로 시스템의 모델을 이용하여 파라메터를 추정하는 방법을 살펴보고 미지입력에 대한 파라메터의 영향을 최소화할 수 있는 방법을

알아본다. 또한 이 방식이 갖는 특징과 함께 장단점을 살펴본다.

3.4.1. 구현 방법

파라메터 추정 방식은 측정 및 그에 대한 연산을 통해 알 수 있는 값을 이용하여 미지수인 파라메터를 근사적으로 구하는 방법으로 (2.3)식과 같은 형태의 모델을 이용한다. 추정하고자 하는 파라메터를 모아서 벡터의 형태로 정의한다.

$$\theta^T = [(a_1 - a_{1F}) \cdots (a_n - a_{nF}) (b_0 - b_{0F}) \cdots (b_m - b_{mF})] \quad (3.42)$$

(2.3)식에서 $y^{(n)}(t)$ 만을 남기고 이항한 후 다음과 같이 입력과 출력의 미분으로 이루어지는 벡터 $\psi(t)$ 를 정의한다.

$$\begin{aligned} \psi(t)^T &= [y^{(n-1)}(t) \ y^{(n-2)}(t) \cdots y(t) \\ &\quad u^{(m)}(t) \ u^{(m-1)}(t) \cdots u(t)] \end{aligned} \quad (3.43)$$

(2.3)식을 위의 두 벡터 θ , $\psi(t)$ 를 이용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$y^{(n)}(t) = \psi(t)^T \theta \quad (3.44)$$

이제 미지수를 결정하기 위한 각기 다른 시점에서의 모델에 대한 정보가 필요하며 이를 샘플링 주기 T 로 샘플링하여 얻었다고 가정한다. 이 때 샘플링을 수행한 시각은 $t = kT$, ($k = 0, 1, \dots$)가 되며 각 시각에서의 (3.44)식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$y^{(n)}(kT) = \psi(kT)^T \theta + e(kT) \quad (3.45)$$

여기서 $e(kT)$ 는 오차로서 각 샘플링 시간에서 수치적인 알고리즘을 이용하여 미분을 구하는 과정에서 발생한 오차와 잡음, 왜란의 영향이 포함되어 있다. $t = k_0 T$ 부터 $t = (k_0 + s) T$ 까지의 결과를 하나로 합하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{bmatrix} y^{(n)}(k_0 T) \\ y^{(n)}((k_0+1)T) \\ \vdots \\ y^{(n)}((k_0+s)T) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \psi(k_0 T)^T \\ \psi((k_0+1)T)^T \\ \vdots \\ \psi((k_0+s)T)^T \end{bmatrix} \theta + \begin{bmatrix} e(k_0 T) \\ e((k_0+1)T) \\ \vdots \\ e((k_0+s)T) \end{bmatrix} \quad (3.46)$$

여기서 $\psi(t)$ 로 이루어진 행렬은 $(n+m+1) \times (s+1)$ 차의 행렬이다. 위의 식을 표기하기 편하도록 다음과 같이 행렬의 형태로 바꾸어 쓰기로 한다.

$$Y^{(n)}(k_0, s, T) = \Psi(k_0, s, T)\theta + E(k_0, s, T) \quad (3.47)$$

추정하고자 하는 파라메터로 이루어진 벡터인 θ 는 유사역행렬(pseudo-inverse)을 이용하여 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\hat{\theta} = \Psi(k_0, s, T)^+ Y^{(n)}(k_0, s, T) - \Psi(k_0, s, T)^+ E(k_0, s, T) \quad (3.48)$$

여기서 θ 가 $\hat{\theta}$ 로 바뀐 것은 추정치임을 의미하며 유사역행렬은 다음과 같다.

$$\Psi(k_0, s, T)^+ = [\Psi(k_0, s, T)^T \Psi(k_0, s, T)]^{-1} \Psi(k_0, s, T)^T \quad (3.49)$$

이 결과는 다음과 같은 오차의 제곱의 합을 최소화시키는 해이기 때문에

$$\sum_{i=0}^s e((k_0+i)T)^2 \quad (3.50)$$

이와 같은 방식을 최소자승법(least square)을 이용한 파라메터 추정 방식이라고 한다. 추정치를 정확히 구하기 위해서

【 모델 기반의 고장 검출 기법에 관한 고찰 】

는 각 샘플링 시간에서 얻은 정보간에 독립성이 유지되어야 하며 이것은 시스템이 충분히 여기되어야 (sufficiently excited) 가능하다[3]. 즉, 입출력에 파라메터를 결정하기 위한 충분한 정보가 포함되어 있어야 한다.

(3.48)식에서 추정한 파라메터를 다음과 같이 나타내면

$$\hat{\theta}^T = [(a_1 - \hat{a}_{1F}) \cdots (a_n - \hat{a}_{nF}) (b_0 - \hat{b}_{0F}) \cdots (b_m - \hat{b}_{mF})] \quad (3.51)$$

정상적인 파라메터인 $\theta_0^T = [a_1 \cdots a_n b_0 \cdots b_m]$ 과의 차를 통해 고장에 대한 추정 정보인 \hat{a}_{if} , \hat{b}_{if} 등을 얻을 수 있다. (3.51)식에서 a_i , b_i 는 상수이므로 추정치를 의미하는 $\hat{\cdot}$ 를 제외하였다.

파라메터를 추정하는 과정에서 (3.48)식과 같이 미지입력을 의미하는 $E(k_0, s, T)$ 의 영향이 포함되는 것을 알 수 있다. 이 영향을 줄이는 방법으로는 파라메터 추정에 대한 미지입력의 영향을 분석하고 이 차이를 보상할 수 있는 한계치를 선정하는 것을 생각할 수 있다. 이를 위해 정상적인 상태를 가정했을 때의 파라메터의 기대값과 고장이 생긴 상태에서의 파라메터의 기대값과의 차이에 대한 확률적 특성을 이용한다. 파라메터 θ 에 대해서 정상적인 상태에서의 추정치를 $\hat{\theta}_n$, 고장이 생긴 상태에서의 추정치를 $\hat{\theta}_f$ 라고 했을 때 다음의 두 가지 가설을 설정하여 고장 검출에 사용한다[1].

$$\begin{aligned} H_0: \hat{\theta}_n &= \theta_f \text{ (정상)} \\ H_1: \hat{\theta}_n &\neq \theta_f \text{ (고장 발생)} \end{aligned} \quad (3.55)$$

이제 정상인 H_0 라는 가설 하에서 정상적인 파라메터 $\hat{\theta}_n$ 과 고장이 발생했을 때의 파라메터 $\hat{\theta}_f$ 를 추정한 후 이 둘의 차에 대한 공분산 S 를 구한다.

$$S = \text{cov}(\hat{\theta}_n - \hat{\theta}_f) \quad (3.56)$$

이 값이 정상적인 파라메터 추정에 대한 편차를 의미하기 때문에 이를 시스템의 고장을 판단할 수 있는 한계치로 설정할 수 있다. 따라서 현재 시스템의 정보를 통해 추정하여 얻은 공분산이 S 보다 크면 정상이라는 가설이 잘못된 것으로 고장이 발생한 것으로 판정한다. 만일 파라메터들 간의 크기에 많은 차이가 나타나면 전제적으로 고른 변화를 관찰하기 위해 S 를 이용하여 정규화하는 방법을 적용할 수 있다[1]. 이 방법을 이용하면 파라메터 추정에 나타날 수 있는 확률적인 특성을 미리 고려함으로써 불확실성의 요인을 최소화할 수 있다.

3.4.2. 특징

이미 기술한 관측기 방식, 검출필터 방식, 패리티 공간 방식들이 시스템의 모델이 고정되어 있다는 가정 하에서 시스템의 고장을 추가적인 입력으로 모델링하여 그 반응을 분석하는데 반해 파라메터 추정 방식은 시스템 모델을 가변적으로 설정하고 그 모델을 이루고 있는 파라메터를 추정하여 고장을 판정하기 때문에 앞의 세 가지 방식과 접근 방법에서 차이가 있다.

앞서 설명한 방식에서는 고장을 벡터로 나타낸 뒤 이 영향만을 고려할 수 있으나 파라메터 추정 방식에서는 고장을 진단하고자 하는 요소가 모든 파라메터에 나타나는 경우가

발생할 수 있다. 이 때에는 모든 파라메터를 추정해야만 정확한 고장 진단을 수행할 수 있기 때문에 계산량이 필요 이상으로 증가할 수 있다. 또한 (3.49)의 유사역행렬이 잘 정의되기 위해서는 입력과 출력에 충분한 정보가 포함되어야 하므로 시스템이 충분히 여기되어야 한다는 조건이 필요하다. 오차에 대한 영향을 보상하기 위해 (3.55), (3.56)식과 같이 공분산을 이용한 한계치를 설정하는 방법을 소개한 바 있으나 사용하고자 하는 신호의 크기에 비해 오차가 지나치게 클 경우에는 올바른 추정 결과를 얻을 수 없으므로 미분 계산에 따르는 정확도를 높이고 측정 잡음의 크기를 줄여야 한다.

그러나 파라메터 추정 방식은 모델에 포함되어 있는 계수를 한꺼번에 추정하기 때문에 하나의 추정 결과를 구하면 동시에 여러 개의 시스템 부분에 대한 고장진단을 수행할 수 있다. 또한 시스템 요소, 구동기, 센서 등의 특성이 파라메터에 나타나기 때문에 이를 추정함으로써 고장에 대한 직접적인 정보를 얻을 수 있다는 장점이 있다.

4. 국내의 연구 현황

국내 모델 기반 FDI 기법에 대한 이론 결과를 대한전기학회, 한국항공우주학회의 논문집에 수록된 논문을 중심으로 살펴보기로 한다. 관측기 방식에는 참고문헌 [11], [12], [13], [34] 등 4편의 논문을 소개하고 검출필터 방식에는 참고문헌 [21], [22], [24] 등 3편의 논문을 소개한다. 참고문헌 [28], [29] 등은 각각 패리티 공간 방식과 파라메터 추정 방식과 관련된 논문이다.

먼저 관측기 방식을 살펴보면 참고문헌 [11]에서는 새로운 방식의 미지입력 관측기를 제안하고 이를 고장진단에 적용하는 방법을 제안하였다. 미지입력을 추정하기 위해 관측기를 이용한 추정된 상태변수를 사용하는데 이로 인해 잔차의 동특성을 나타내는 식에 특이(singular) 행렬이 포함된다. 이 논문에서는 이로 인한 추정오차식의 안정성과 관측기의 이득행렬을 선정하는데 대한 분석과 적절한 설계 방법을 제안하였다. 이 방법은 미지입력 관측기에 대한 존재 조건이 만족되면 직접적으로 고장신호를 추정하여 고장진단 시스템에 응용할 수 있으며 미지입력에 대해 강인한 특성을 갖고 있으므로 실제로 적용하는데 유리하다.

참고문헌 [12]에서는 단일 칼만 필터와 적응관측기를 이용하여 고장 진단 및 분리를 실현한 결과를 제안하였다. 일반적인 관측기 방식에서는 여러 개의 관측기를 이용하여 잔차를 생성하는 단계에서 고장 분리를 쉽게 수행할 수 있도록 하는데 비해 이 방식에서는 단일 칼만 필터에 의한 잔차에 대해서 시간에 따른 확률적 특성을 적용횡구조필터(adaptive transversal filter)를 이용하여 분석함으로써 고장 분리를 수행할 수 있도록 하였다. 이 방법을 이용하면 적응필터의 특성에 따른 고장 검출에 필요한 기준치를 정량적으로 제시하지는 못하지만 고장에 대한 모델링이 필요하지 않기 때문에 실제 고장에 대한 정보가 정확하게 주어져 있는 않은 경우에 적용할 수 있다.



교장검출 진단 및 고장회복 제10

참고문헌 [13]에서는 고장신호에 대한 모델을 대상·시스템 모델에 포함시킨 뒤 함수관측기(functional observer)를 구성하여 고장신호를 직접적으로 추정하는 방식을 제안하였다. 이 방식은 발생할 가능성이 있는 고장에 대한 모델이 주어지면 고장신호에 대한 정확한 정보를 추정함으로써 이를 제어기에 응용할 수 있으며 함수관측기를 설계할 때 실제 시스템의 차수보다 작은 차수의 관측기를 설계할 수 있기 때문에 구현이 간단하고 계산량이 적다는 장점이 있다. 참고문헌 [34]에서는 참고문헌 [13]의 내용을 확장하여 고장 발생 시에 고장에 대한 추정치를 이용하여 이를 보상하는 방식을 통해 안정성을 유지하는 시스템을 제안하였다.

검출필터 방식을 살펴보면 참고문헌 [21]에서는 검출차수가 2차로 주어질 때, 2개의 고유치를 지정하기 위한 검출이득을 결정하는 효과적인 방법을 제안하였다. 이 결과는 참고문헌 [17]에서 중복되지 않은 고유치에 대한 결과만을 제시하였기 때문에 이를 중복되는 고유치의 경우로 확장하고 고유치를 어떻게 지정하는가에 관계없이 참고문헌 [17]의 결과와 동일한 결과를 얻을 수 있음을 증명하였다.

참고문헌 [22]에서는 검출공간과 검출차수를 선형 시스템 이론에서의 전달영점(transmission zero)을 이용하여 해석하는 방법을 제안하고 시스템 변환을 통해 Beard가 제안한 검출생성자(detection generator)를 계산하는 효과적인 방법을 제안하였다. 또한 검출공간이 이상벡터와 전달영점벡터들로 이루어지는 공간과 동일하기 때문에 검출차수는 전달영점의 개수보다 하나 많은 수라는 점을 증명하였다. 이 논문에서의 결과를 이용하면 간단한 상태변환과 다항식을 풀어서 검출생성자를 간단하게 구할 수 있으므로 검출공간의 고유치를 지정하는데 유리하다. 또한 검출공간의 성질을 전달영점을 통해 분명하게 보일 수 있다는 장점이 있다.

참고문헌 [24]에서는 검출필터에 관한 이론과 설계 방법을 White의 이론에 따라 설명하고 미지입력에 관한 견실성의 문제를 고려하였다. 미지입력을 일정한 방향으로 들어오는 추가적인 고장으로 모델링하여 검출공간을 할당하고 특정한 행렬을 잔차에 곱해 잔차에서 나타나는 미지입력의 영향을 제거하는 방법을 제안하였다. 또한 방향성이 없는 백색잡음에 대한 영향을 제거하는 방법으로, 검출필터를 설계하고 남은 자유도를 이용하여 검출공간에 해당하는 고유치를 제외한 나머지 고유치를 적절히 지정함으로써 잡음에 대한 잡음에 대한 안정성을 향상시키는 방법을 제안하였다.

페리티 공간 방식에 대한 결과인 참고문헌 [28]에서는 페리티 공간 방식을 이용하여 고장 검출뿐만 아니라 고장 분리까지 수행하기 위해 페리티 관계식에 이용할 새로운 행렬을 제안하고 이 행렬이 존재할 조건과 특성을 분석하였다. 또한 왜란에 대한 영향과 시스템의 영점에 대한 영향을 분석하였다. 이 방식은 일반적인 페리티 공간 방식에서의 장점과 마찬가지로 쉽게 페리티 관계식을 유도할 수 있으며 고장진단을 행렬연산만으로 수행할 수 있기 때문에 컴퓨터로 쉽게 구현할 수 있다는 장점이 있다.

파라메터 추정 방식에 대한 연구 결과는 참고문헌 [29]에서 찾아볼 수 있다. 이 논문에서는 파라메터 추정에 있어 발

생할 수 있는 미지입력에 의한 영향을 분석하고 이를 감안하여 추정한 파라메터의 변동폭을 통해 고장 여부를 판정할 수 있도록 한계치를 선정하는 방법을 제안하였다. 이를 위해 사전에 얻은 시스템에 대한 정보를 이용하여 가설을 설정하고 이 가설에 따른 추정치를 확률이론을 통해 분석하여 얻은 한계치와 비교함으로써 고장을 진단한다. 이 방식을 이용하면 미지입력에 정보가 주어졌을 때 파라메터 추정에 나타나는 미지입력의 영향을 파악할 수 있으며 이를 통해 고장 검출에 있어서 견실성을 향상시킬 수 있는 장점이 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 실시간 고장진단 시스템 중에서 모델 기반 FDI 기법을 중심으로 현재까지의 연구 결과를 설명하고 특징을 분석하였다. 모델 기반 FDI 기법을 잔차를 생성하는 방법에 따라 관측기 방식, 검출필터 방식, 페리티 공간 방식, 파라메터 추정 방식 등의 네 가지로 구분하고 각각의 구현 방법을 설명하였다. 이들 방식은 기존의 제어 이론을 사용하여 구현되지만 고장 검출 및 분리의 목적을 위해 특정한 조건을 추가적으로 부여한다는 점을 고려하여 기존 제어 이론이 어떠한 방식으로 고장 검출 및 분리에 사용되는가를 중심으로 살펴보았다. 잔차를 생성하는 과정에서 모델링 오차, 잡음, 왜란 등의 미지입력에 대한 견실성을 확보하기 위한 방안을 살펴보았다.

국내의 모델 기반 FDI 분야 연구 결과를 1980년 이후의 대한전기학회, 한국항공우주학회의 논문집에 수록된 논문을 중심으로 소개하였다. 이들 결과는 모델 기반 FDI 기법의 단점을 보완하거나 개념을 확장시킨 것이며, 특히 많은 결과들이 미지입력에 대한 견실성 문제에 초점을 맞추고 있음을 볼 수 있었다.

참고문헌

- [1] 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
- [2] Rolf Isermann, "Process Fault Detection Based on Modeling and Estimation Methods - A Survey", *Automatica*, Vol. 20, No. 4, pp. 387-404, 1984
- [3] Patton. R. J., P. M. Frank, R. N. Clark, "Fault Diagnosis in Dynamic Systems", *Theory and Applications*, Prentice-Hall, 1989
- [4] Frank. P. M., "Enhancement of robustness in observer-based fault detection", *International Journal of Control*, Vol. 59, No. 4, pp. 955-981, 1994
- [5] R. N. Clark, "Instrument Fault Detection", *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 14, No. 3, pp. 456-465, 1978

【 모델 기반의 고장 검출 기법에 관한 고찰 】

- [6] R. N. Clark, "A Simplified Instrument Failure Detection Scheme", IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 14, No. 4, pp. 558-563, 1978
- [7] R. N. Clark, D. C. Fosth, V. M. Walton, "Detecting Instrument Malfunctions in Control Systems", IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 11, No. 4, pp. 465-473, 1975
- [8] P. M. Frank, L. Keller, "Sensitivity Discriminating Observer Design for Instrument Failure Detection", IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 16, No. 4, pp. 460-467, 1980
- [9] R. J. Patton, S. W. Willcox, "Parameter-Insensitive Technique for Aircraft Sensor Fault Analysis", AIAA Journal of Guidance, Vol. 10, No. 4, pp. 359-367, 1987
- [10] Patton. R. J., Chen. J., "Optimal Unknown Input Distribution Matrix Selection in Robust Fault Diagnosis", Automatica, Vol. 29, No. 4, pp. 837-842, 1993
- [11] 진재현, 탁민재, "미지입력 관측기를 이용한 제어 시스템의 고장진단", 한국항공우주학회지, 제24권 1호, pp. 106-113, 1996
- [12] 이연석, 이상규, "적응예측기를 이용한 고장파악방법", 전기학회논문지, 제39권 2호, pp. 210-217, 1990
- [13] 이기상, 배상숙, "고장벡터 모델링에 의한 프로세스 고장검출필터의 설계 및 응용", 전기학회논문지, 제36권 6호, pp. 430-436, 1987
- [14] R. V. Beard, "Failure Accommodation in Linear Systems through Self-reorganization", Ph.D. dissertation, Dep. Aeronautics and Astronautics, Mass. Inst. Technol., 1971
- [15] M. Massoumnia, "A Geometric Approach to the Synthesis of Failure Detection Filters", IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. AC-31, No. 9, pp. 839-846, Sep. 1986
- [16] J. E. White and J. L. Speyer, "Detection Filter Design: Spectral Theory and Algorithms", IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. AC-32, No. 7, pp. 593-603, July 1987
- [17] Park. J., Rizzoni. G., "An Eigenstructure Assignment Algorithm for the Design of Fault Detection Filters", IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 39, No. 7, pp 1521-1524, 1994
- [18] Park. J., Rizzoni. G., Ribbens. W. B., "On the Representation of Sensor Faults in Fault Detection Filters", Automatica, Vol. 30, No. 11, pp. 1793-1795, 1994
- [19] Park. J., Rizzoni. G., "A New Interpretation of the Fault Detection Filter-Part 1: Closed-form Algorithm", International Journal of Control, Vol. 60, No. 5, pp. 767-787, 1994
- [20] Park. J., Rizzoni. G., "A New Interpretation of the Fault Detection Filter-Part 2: The Optimal Detection Filter", International Journal of Control, Vol. 60, No. 6, pp. 1339-1351, 1994
- [21] 이근재, 박재홍, "고유구조 지정을 이용한 2차 검출 필터 설계", 전기 학회 논문지, 46권 5호, pp. 749-756, 1997
- [22] 김용민, 박재홍, "전달영점을 이용한 이상검출필터에 있어서의 검출공간 및 검출차수의 정의", 전기 학회 논문지, 제47권 8호, pp. 1232-1238, 1998
- [23] Chung. W. H., Speyer. J. L., "A Game Theoretic Fault Detection Filter", IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 43 No. 2, pp. 143-161, 1998
- [24] 조성준, 김도현, 김유단, "고유공간지정법을 이용한 항공기 고장검출필터의 설계에 관한 연구", 한국항공우주학회지, 제24권 4호, pp. 126-134, 1996
- [25] Xi-Cheng Lou, Alan S. Willsky, George C. Verghese, "Optimally Robust Redundancy Relations for Failure Detection in Uncertain Systems", Automatica, Vol. 22, No. 3, pp. 333-344, 1986
- [26] Edward Y. Chow, Alan S. Willsky, "Analytical Redundancy and the Design of Robust Failure Detection Systems", IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 29, No. 7, pp. 603-614, 1984
- [27] Gertler. J., Singer. D., "A New Structural Framework for Parity Equation-based Failure Detection and Isolation", Automatica, Vol. 26, No. 2, pp. 381-388, 1990
- [28] 진재현, 탁민재, "Parity Space 방법을 이용한 제어시스템의 고장진단", 한국항공우주학회지, 제24권 2호, pp. 116-124, 1996
- [29] 권오규, 이명의, "모델링 오차를 갖는 불확정 시스템에서의 견실한 이상 검출법", 전기학회논문지, 제39권 7호, pp. 729-739, 1990
- [30] Saif. M., Guan. Y., "A New Approach to Robust Fault Detection and Identification", IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 29, No. 3, pp. 685-695, 1993
- [31] Basseville. M., "Information Criteria for Residual Generation and Fault Detection and Isolation", Automatica, Vol. 33, No. 5, pp. 783-802, 1997
- [32] H. L. Jones, "Failure Detection in Linear Systems", Rep. T-608, Charles Stark Draper Lab. Cambridge. MA., 1971
- [33] Jiang. J., Jia. F., "A Robust Fault Diagnosis Scheme Based on Signal Modal Estimation", International Journal of Control, Vol. 62, No. 2, pp. 461-475, 1995
- [34] 이기상, 김성호, 송명현, 류지수, "이중관측기를 이용한 고장검출 유니트 및 고장보상제어시스템의 설계", 전기학회논문지, 제44권 1호, pp. 117-125, 1995



고장검출 전달 및 고장회복 시스템

- [35] Chi-Tsong Chen, "Linear System Theory and Design", Holt, Rinehart and Winston, Inc., 1984
- [36] Wang. H, Daley. S, "Actuator Fault Diagnosis: An Adaptive Observer-Based Technique", IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 41, No. 7, pp. 1073-1078, 1996
- [37] Demetriou. M. A., Polycarpou. M. M, "Incipient Fault Diagnosis of Dynamical Systems Using Online Approximators", IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 43, No. 11, pp. 1612-1617, 1998
- [38] Faitakis. Y. E., Kantor. J. C., "Residual Generation and Fault Detection for Discrete-time Systems using an l-infinite Technique", International Journal of Control, Vol. 64, No. 1, pp. 155-174, 1996
- [39] Frank. P. M., Ding, X, "Frequency Domain Approach to Optimally Robust Residual Generation and Evaluation for Model-based Fault Diagnosis", Automatica, Vol. 30, No. 5, pp. 789-804, 1994
- [40] Liu. B., Si. J., "Fault Isolation Filter Design for Linear Time-Invariant Systems", IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 42, No. 5, pp. 704-707, 1997
- [41] J. O'Reilly, "Observers for Linear Systems", Academic Press, 1983
- [42] Chen. J., Patton. R. J., Zhang. H. Y., "Design of unknown input observers and robust fault detection filters", International Journal of Control, Vol. 63, No. 1, pp. 85-105, 1996
- [43] Piercy. N. P., "Sensor Failure Estimators for Detection Filters", IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 37, No. 10, pp. 1553-1558, 1992
- [44] Srichander. R., Walker. B. R., "Stochastic Stability Analysis for Continuous-time Fault Tolerant Control Systems", International Journal of Control, Vol. 57 No. 2, pp. 433-452, 1993
- [45] Tsui. C. C., "A General Failure Detection, Isolation and Accommodation System with Model Uncertainty and Measurement Noise", IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 39, No. 11, pp. 2318-2321, 1994
- [46] Wang. H, Huang. Z. J., Daley. S., "On the Use of Adaptive Updating Rules for Actuator and Sensor Fault Diagnosis", Automatica, Vol. 33, No. 2, pp. 217-224, 1997
- [47] Zhang. Y., Li. X. R., "Detection and Diagnosis of Sensor and Actuator Failures Using IMM Estimator", IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 34, No. 4, pp. 1293-1313, 1998
- [48] Zolghadri. A., "An Algorithm for Real-Time Failure Detection in Kalman Filters IEEE Transactions on Automatic Control", Vol. 41, No. 10, pp. 1537-1539, 1996

저자 소개



김용민(金容旻)

1970년 7월 28일생. 1994년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1996년 서울대 공대 전기공학과 졸업(석사). 1996년 - 현재 서울대 공대 전기공학부 박사과정.



이태연(李太演)

1973년 5월 5일생. 1996년 서울대 공대 전기공학부 졸업. 1998년 서울대 공대 전기공학부 졸업(석사). 1998년 - 현재 서울대 공대 전기공학부 박사과정.



박재홍(朴宰弘)

1961년 1월 11일생. 1983년 서울대 공대 제어계측공학과 졸업. 1984년 미시간 주립 대 졸업(석사). 1991년 미시간대 졸업 (공 박). 1991년 - 1994년 미시간대 전자공학부 연구조교수, Vehicular Electronics Laboratory Assistant Director. 1994년 - 1999년 서울대 공대 전기공학부 조교수. 1999년 4월 - 현재 서울대 공대 전기공학부 부교수. 제어계 측신기술연구센터(ERC-ACI) 참여교수. 서울대학교 자동화 시스템공동연구소(ASRI) 참여교수.