

관성센서의 이중 고장을 고려한 고장 검출 및 분리

FDI considering Two Faults of Inertial Sensors

김 광 훈, 박 찬 국, 이 장 규

(Kwang Hoon Kim, Chan Gook Park, and Jang Gyu Lee)

Abstract : Inertial navigation system with hardware redundancy must use FDI(Fault Detection and Isolation) method to remove the influence of faulty sensors. Until now, several FDI methods such as PSA(Parity Space Approach), GLT(Generalized Likelihood ratio Test) and OPT(Optimal Parity vector Test) method are generally used. However, because these FDI methods only consider the situation that the system has one faulty sensor, these methods cannot be directly adapted for the system with two faulty sensors. To solve this problem, in this paper, PSA method is analyzed and based on this result, new FDI method called EPSA is proposed to consider a detection and an isolation of two faulty sensors in inertial navigation system.

Keywords : FDI, INS, sensor fault, two faults, hardware redundancy

I. 서론

비행기나 우주선, 화학 공장 설비, 원자력 관련 장비와 같은 복잡한 시스템에서는 센서 신호의 유효성이 매우 중요한 요소이다. 일반적으로 시스템 성능의 향상과 안정성을 강화시키기 위해서 예전부터 선호되어 오던 방식은 여분의 센서를 더 사용하는 방식이다. 여분의 센서를 사용하는 시스템에서 센서 신호의 유효성을 검증하는 일은 크게 센서의 고장을 검출하고 분리시키는 FDI(fault detection and isolation) 문제와 신호의 보정 및 추정 문제로 구분해 볼 수가 있는데 본 논문에서는 주로 센서의 FDI 문제에 대해 다루고 있다.

일반적으로 FDI는 잔차 생성(residual generation) 부분과 고장 및 분리 판단 부분(decision making)으로 구분할 수 있다. 센서의 출력을 가공하면 고장의 영향에 가장 민감하게 반응하는 변수를 얻을 수 있고, 이 변수를 통해 고장을 감지 할 수 있는데 일반적으로 이렇게 가공된 변수를 잔차(residual) 라고 부른다. 여분의 센서를 가진 시스템에서는 측정된 센서의 출력 값과 정상상태에서 기대되는 센서 값의 차이를 통해 잔차를 구하곤 한다. 잔차를 구하는 방법으로는 패리티 벡터(parity vector)와 패리티 공간(parity space) 개념을 이용한 PSA(parity space approach) 기법을 비롯하여 GLT (generalized likelihood ratio test), OPT(optimal parity vector test) 등이 있다[1~5]. 현재 사용되고 있는 FDI 기법들은 매우 다양하며 서로 다른 방식들을 이용하고 있다.

PSA는 Potter와 Suman[1]에 의해 처음 제안되어졌으며, 1991년 Asok Ray와 Rogelio Luck[2]는 널리 사용되어 온 PSA 기법을 정리한 논문을 발표했다. PSA에 대한 자세한

설명은 III장에서 자세하게 다룰 것이다. PSA 개념은 다양한 분야에 사용되어 왔는데 예를 들어 원자로의 FDI에 적용되기도 하였다[3].

기본적인 PSA 개념을 바탕으로 χ^2 표를 이용하지 않고 각 가정 상황에 대한 우도의 비(likelihood ratio)를 이용한 방법이 Daly 등에 의해 제안되어졌는데 이 기법을 GLT 라고 부른다[4]. 이 기법은 고장에 가장 민감한 고장 바이어스의 값을 추정하기 위해 우도(likelihood)를 사용하며, 이를 바탕으로 고장 검출 함수 및 고장 분리 함수를 구한다. 또한 각 센서별로 최적의 패리티 벡터를 구하여 FDI를 수행하는 OPT 기법이 Hong Jin 등에 의해 제안되어졌다[5]. 그러나 현재까지 제안된 거의 모든 FDI 기법들은 센서의 단일 고장만을 고려해서 제안된 기법들이며[1~5], 센서의 이중 고장을 고려한 연구 결과는 그리 많지 않다. 이중 고장을 다룬 일부 논문들은 주로 전체 센서 중에서 임의로 두 개의 센서를 제외시킨 후 패리티 벡터를 구할 경우 고장 센서가 제외되었을 때 패리티 벡터로 구한 값이 최소가 된다는 사실을 이용하거나[6], GPS RAIM과 같은 특별한 경우를 고려한 논문[7]들이다. 하지만 이들 기법들은 실제 이중 고장 상황을 단순하게 가정하고 적용함으로써 FDI 성능이 떨어질 수밖에 없다. 결론적으로 기존에 제안된 단일고장을 고려한 기법들은 이중 고장 상황에 적용하기엔 적합하지 않으며 일부 제안된 이중 고장 기법들은 성능이 떨어진다. 그러므로 이중 고장을 고려하기 위해서는 좀 더 구체적으로 이중 고장 상황을 모델링하고 각 상황에 대응하는 새로운 FDI 기법을 제안해야만 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저 II장에서는 고려하고 있는 시스템의 측정방정식을 정의한다. III장에서는 기존에 제안된 단일 고장을 고려한 PSA 기법의 개념 및 FDI 기법을 소개하고 그 성능을 분석한다. IV장에서는 이중 고장을 고려한 FDI 기법을 제안하며 V장에서는 IV장에서 제안된 FDI 기법의 성능을 분석한다. 마지막으로 VI장에서 결과를 정리한다.

*책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2003. 3. 19., 채택확정 : 2003. 9. 1.

김광훈 : 서울대학교 전기컴퓨터공학부(kwang@asri.snu.ac.kr)

박찬국 : 서울대학교 기계항공공학부(chanpark@snu.ac.kr)

이장규 : 서울대학교 전기컴퓨터공학부(jgl@snu.ac.kr)

※ 본 논문은 국방과학연구소 및 서울대학교 자동제어특화연구센터의 연구비 지원에 의한 연구 결과임.

II. 측정방정식

일반적으로 여분의 센서 l 개를 사용하는 시스템의 측정 방정식은 다음과 같다.

$$m = Hx + \varepsilon + f \quad (1)$$

여기서 m 은 센서의 측정치를 나타내는 $l \times 1$ 벡터이며, H 는 센서의 배치에 의해 결정되는 $l \times n$ 측정행렬로서, l 개의 센서들의 동체 좌표축에 대한 방향 벡터로 구성된다. 실제로는 ΔH 성분이 존재하기 때문에, 이에 대한 추정 또는 보정 작업이 있어야 하지만 본 논문에서는 FDI 문제만을 다루기 때문에 ΔH 에 대해서는 이미 보정이 된 상태라고 가정한다. 즉, 본 논문에서는 H 값을 정확히 알고 있다고 가정한다. x 는 $n \times 1$ 상태변수 벡터로 우리가 구하고자 하는 값들이다. ε 은 $E[\varepsilon] = 0$, $COV[\varepsilon] = I_l$ 조건을 만족하는 $l \times 1$ 가우시안(gaussian) 측정 잡음이다.

위에서 $E[\cdot]$ 은 평균을 의미하며, $COV[\cdot]$ 은 공분산을 나타내는 기호이다. I_l 은 차원(dimension)이 l 인 단위행렬을 의미한다. (단, $l > n \geq 1$)

본 논문에서 f 는 고장신호벡터를 의미하며, 센서가 고장 났을 경우 특정한 바이어스 값을 가지게 되는 것으로 고장상황을 모델링 한다. 고장신호의 형태는 매우 다양할 수 있으며 상수 바이어스 형태는 수많은 고장 신호 중의 특별한 형태이다. 그러나 이와 같은 가정이 센서 고장을 완벽하게 표현하고 있는 것은 아니지만, 특정 바이어스 성분의 영향이 지배적인 점과 이 가정을 사용한 기존 FDI 문헌들이 만족스러운 결과들을 보여주고 있는 것을 고려해 볼 때 일반적인 가정이라 할 수 있다. 만약 i 번째 센서가 고장 났을 경우 $f = f_i$ 라고 표시하며, i, j 번째 센서가 동시에 고장 났을 경우 $f = f_{i,j}$ 라고 표시한다. 여기서 $f_{i,j}$ 는 i, j 번째 성분 값이 고장 바이어스 값을 가지고 나머지는 모두 0인 $l \times 1$ 벡터를 의미한다.

III. 단일 고장을 고려한 PSA 기법

고장을 감지하기 위해서는 시스템의 상태변수에는 독립적이면서 고장 요인에만 영향을 받고, 그 영향을 가장 잘 반영할 수 있는 변수를 얻어내는 것이 중요하다. 잔차 생성 및 고장 검출 및 분리를 하는 기법으로 가장 많이 사용되는 기법들 중의 하나인 PSA 기법에서는 이런 역할을 하는 패리티 벡터를 정의하여 사용한다. 패리티 벡터를 구하기 위해서는 먼저 다음과 같은 행렬 V 를 계산하는 작업이 필요하다.

1. 행렬 V 구하기

PSA 기법은 FDI 문헌에서 자주 언급되는 방법으로 Potter와 Suman[1]에 의해 처음 제안되어졌으며, 다음과 같이 세 가지 기본적인 가정을 한다.

가정 1 : $VH = 0$

가정 2 : $VV^T = I_{l-n}$

가정 3 : 행렬 V 는 사다리꼴(trapezoidal) 행렬이면서 양의 한정(positive definite) 이어야만 한다.

여기서 행렬 V 는 다음과 같이 정의되며 V 의 차원은 $(l-n) \times l$ 이다. v_i^T 는 행렬 V 의 i 번째 행을 의미하며 v_{cj} 는 j 번째 열을 의미한다.

$$V = [v_1 \ v_2 \ \dots \ v_{l-n}]^T = [v_{c1} \ v_{c2} \ \dots \ v_{cl}] \quad (2)$$

행렬 H 의 랭크(rank)가 n 이므로, $v_i^T H = 0$ 를 만족하는 $l \times 1$ 선형 독립 벡터가 $v_1 \ v_2 \ \dots \ v_{l-n}$ 즉, $l-n$ 개 존재한다. 일반적으로 V 는 차원이 $l \times l$ 인 행렬로 정의할 수 있는데, 이럴 경우 총 l 개의 패리티 식을 얻어낼 수 있다. 하지만 V 를 (2)와 같이 정의하게 되면 l 개의 패리티 식 중에서 $l-n$ 개만을 사용하는 것과 같게 된다.

본 논문에서 (2)와 같이 V 를 정의한 이유는 n 개의 패리티 식이 다른 패리티 식에 의해 표현될 수 있기 때문에, 즉 새로운 정보를 주지 않기 때문이다[4].

2. PSA 기법의 기본 개념

정의 1 : 패리티 공간 (Parity Space)

행렬 V 의 열공간(column space)을 행렬 H 의 패리티 공간(parity space)이라고 정의한다.

정의 2 : 패리티 벡터 (Parity Vector)

다음과 같은 벡터 p 를 패리티 벡터(parity vector)라고 정의한다.

$$p = Vm = VH + V\varepsilon + Vf = V\varepsilon + Vf \quad (3)$$

패리티 벡터는 V 를 통한 패리티 공간 위로의 m 의 투영(projection)을 의미하며, 시스템의 상태변수에 독립적이면서 오로지 측정 잡음과 고장 바이어스 성분에 의해서만 영향을 받으므로 센서의 고장을 감지하는 변수로 사용할 수 있다. 앞에서 구한 V 의 차원이 $(l-n) \times l$ 이기 때문에 p 의 차원은 $(l-n) \times 1$ 이다.

정의 3 : 고장 방향 (Fault Direction)

각각의 측정치 m_k 에 대응되는 v_{ck} 가 패리티 공간을 이루면서 패리티 공간에서 v_{ck} 가 지시하는 방향을 고장 방향(fault direction)이라고 부른다.

위의 정의는 즉, k 번째 센서에 고장이 발생한 경우 패리티 공간에서의 v_{ck} 의 방향으로 패리티 벡터 p 의 크기가 크게 증가함을 의미한다. 일반적으로 고장이 나지 않은 정상 상태의 경우 p 의 크기가 매우 작으나, 고장이 발생할 경우 고장 난 센서의 고장 방향을 따라 p 의 크기가 크게 증가하게 된다.

3. PSA 기법을 이용한 FDI 방법

패리티 벡터를 통해 FDI를 수행할 경우 일반적으로 χ^2 분포를 이용한다. 정상 상태일 때 앞의 가정 및 정의에 의해 $\varepsilon \sim N(0, I_l)$, $p \sim N(0, I_{l-n})$ 이 만족되므로 우리는 $p^T p$ 가 χ^2 분포를 이루고 있음을 알 수 있다. 패리티 벡터는 $p = [p_1 \ p_2 \ \dots \ p_{l-n}]^T$ 와 같이 표현되어지며, 여기서 p_i 는 패리티 방정식이라고 한다. 결국 $p^T p$ 는 $\chi^2 = p^T p = p_1^2 + p_2^2 + \dots + p_{l-n}^2$ 이다. 즉 $p^T p$ 는 $(l-n)$ 자유도를 가진 χ^2 분포를 이루며, 우리는 $p^T p$ 를 고장검출

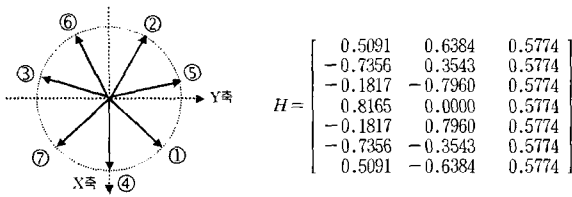


그림 1. 관성센서 배치.

Fig. 1. Configuration of inertial sensors.

(FD) 함수로 사용한다. 즉 $FD = p^T p$ 이다.

일단 FA(false alarm) 확률 값 α 가 정해지면 χ^2 분포 표로부터 $P(\chi^2 \geq T) = \alpha$ 를 만족하는 경계 값(threshold value) T 를 구할 수 있다. 여기서 P 는 확률을 나타내는 기호이다. 고장 검출은 간단하다. 만약 $p^T p \leq T$ 이면 고장이 나지 않은 것으로 판단하고, $p^T p > T$ 이면 고장이 난 것으로 판단한다. 고장 난 센서의 분리를 위해서는 고장분리 함수(FI)를 다음과 같이 정의한다. 즉,

$$FI_k = \frac{v_{ck}^T p}{\|v_{ck}\|} \quad (4)$$

이다. 이 함수는 패리티 벡터를 각 센서의 고장 방향으로 투영(projection)시켜서 그 값을 얻는 것으로 l 개의 FI 함수가 존재하며, 가장 큰 값을 나타내는 것이 고장 날 가능성이 높다고 볼 수 있다. 예를 들어 FI_k 값이 가장 크다면 우리는 k 번째 센서가 고장 난 것으로 판단하고 센서 분리를 하면 된다.

4. 단일, 이중 고장 상황에서의 PSA 기법의 성능 분석

센서의 단일 고장(CASE 1)과 이중 고장(CASE 2)이 일어났을 때의 PSA 기법의 성능을 시뮬레이션을 통해 분석해보자. 몬테카를로 시뮬레이션을 10,000번 수행하였으며 센서 배치는 그림 1과 같이 구성하였다.

4.1 관성 센서 배치

그림 1은 센서 7개를 z축을 중심으로 원뿔(cone)모양으로 배치한 것으로, z축과 각 센서 축과의 각도는 54.74° 이다. 각 센서들은 z축 위에서 볼 때 그림과 같이 균등하게 분포되어 있다.

센서의 배치가 1번부터 순서대로 되어 있지 않은 이유는 Potter와 Suman이 제안한 행렬 V 를 구하는 알고리즘을 적용할 때 아래와 같이 엇갈려 센서를 배치하는 것이 유리하기 때문이다. 센서의 기하학적 배치에 의해 얻어진 H 를 바탕으로 Potter와 Suman의 알고리즘을 통해 다음과 같은 행렬 V 를 얻을 수 있다.

$$V = \begin{bmatrix} 0.7559 & -0.1049 & 0.1516 & -0.4246 & -0.4246 & 0.1516 & -0.1049 \\ 0 & 0.7486 & -0.0847 & 0.0935 & -0.4883 & -0.4076 & 0.1383 \\ 0 & 0 & 0.7406 & -0.0095 & 0.1858 & -0.5110 & -0.3962 \\ 0 & 0 & 0 & 0.6254 & -0.3393 & 0.3393 & -0.6112 \end{bmatrix}$$

행렬의 각 열은 고장 방향을 나타내며, 각 열이 나타내는 고장 방향들 간의 벌어진 각도는 표 1과 같다. 이 각도는 이중 고장 상황을 분석할 때 사용할 것이다. 표 1에서 1-2는 1번 센서와 2번 센서와 관련되어 있는 고장 방향들 간의

표 1. 1번 센서-다른 센서들 간의 고장 방향 각도.

Table 1. Fault direction angle between sensor #1 and others.

센서 번호	1-2	1-3	1-4	1-5	1-6	1-7
각도(degree)	97.98 ^o	78.50 ^o	123.88 ^o	124.28 ^o	78.37 ^o	98.05 ^o

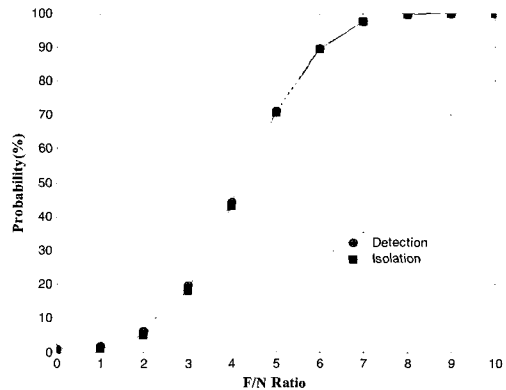


그림 2. 단일 고장일 때의 PSA 기법의 FDI 결과.

Fig. 2. FDI result of PSA (CASE 1).

사이 각을 의미한다.

1번 센서와 다른 센서들의 고장 방향들 간의 각을 보면 1번 센서 바로 옆에 있는 4번 센서와 5번 센서가 고장 방향으로 볼 때는 가장 큰 각도로 벌어져 있으며, 위치상으로 가장 멀리 떨어져 있는 3번과 6번 센서가 고장 방향으로 볼 때는 가장 작은 각을 이루고 있음에 주목할 필요가 있다.

4.2 단일 고장시 PSA 성능

시뮬레이션을 통해 단일 고장 상황에서의 PSA의 성능을 살펴보자.

먼저 단일 고장 상황을 구현하기 위해 잡음의 크기를 기준으로 상대적인 크기의 고장 바이어스를 한 개의 특정 센서에 인가한다. 그리고 F/N Ratio (fault to noise ratio)에 따른 고장 검출 및 분리 성능을 살펴보면 그림 2와 같은 결과를 얻을 수 있다. 이 때, 고장 바이어스는 1번 센서에만 인가했으며 FA는 0.01로 설정했다.

F/N Ratio의 크기가 커짐에 따라 10,000번의 수행 중 고장이 검출되는 수가 급격히 증가함을 볼 수 있다. F/N Ratio가 8 이상이 되면 거의 대부분의 고장이 검출되고 있다. 고장 검출 확률, 분리 확률 값도 고장 검출 수가 증가함에 따라 함께 급격히 커졌다. 즉, 고장 바이어스의 크기가 커짐에 따라 고장 센서를 거의 대부분 성공적으로 분리하고 있음을 알 수 있다. 전반적으로 단일 고장일 경우 FDI가 잘 수행되고 있음을 알 수 있다.

4.3 이중 고장시 PSA 성능

시뮬레이션을 통해 이중 고장 상황에서의 PSA의 성능을 살펴보자. 먼저 이중 고장 상황을 구현하기 위해 잡음의 크기를 기준으로 상대적인 크기의 고장 바이어스를 두 개의 특정 센서에 인가한다. 그리고 F/N Ratio (Fault to Noise Ratio)에 따른 고장 검출 및 분리 성능을 살펴보면 그림 3

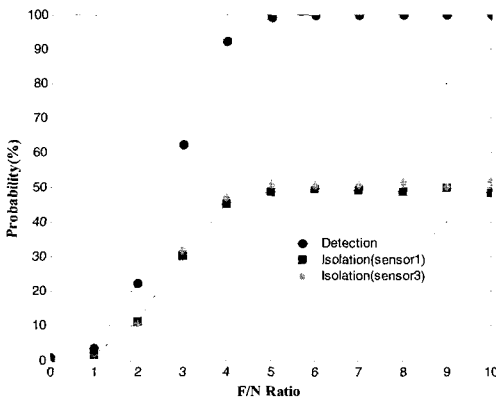


그림 3. 이중 고장일 때의 PSA 기법의 FDI 결과.

Fig. 3. FDI result of PSA (CASE 2).

표 2. 두 센서에 고장신호를 인가했을 경우 PSA 성능 (F/N Ratio 5).

Table 2. PSA performance in case of two sensor faults and F/N Ratio 5.

두 개의 고장 센서 번호		1-2	1-3	1-4	1-5	1-6	1-7
고장 검출 수		9525	9946	6352	6155	9947	9467
센서 분리 횟수	1번	4796	4895	2345	2330	5050	4849
	2번	4704	0	152	0	0	7
	3번	16	5050	149	1256	0	0
	4번	0	1	2406	0	0	0
	5번	0	0	0	2272	0	0
	6번	0	0	1300	147	4897	12
	7번	9	0	0	150	2	4599

과 같은 결과를 얻을 수 있다. 이 때, 고장 바이어스는 임의로 1번과 3번 센서에만 인가했으며 FA는 0.01로 설정했다.

그림 3은 센서 1번과 센서 3번이 함께 고장 났을 때의 FDI 결과를 보인 것으로 고장 검출에는 문제가 없지만 분리에 있어서는 약 50%에서 수렴하고 있으므로 이중 고장 상황에서는 FDI 기법으로 기존의 PSA 기법을 사용할 수가 없음을 알 수 있다.

이는 PSA 기법이 1개의 고장 센서만을 분리하도록 설계 되어있기 때문이며, 고장 센서가 2개일 경우 각각 평균적으로 50% 정도씩 분리 될 수밖에 없다. 좀 더 세부적인 분석을 위해 이번에는 센서 1번과 다른 센서 한 곳에 F/N Ratio 5를 인가해보자. 표 2는 그 결과를 정리한 것이다.

먼저 고장 검출 수를 살펴보면 대부분 좋은 검출 결과를 보여주고 있지만 센서 1번과 4번 또는 센서 1번과 5번이 함께 고장 났을 경우에는 고장 검출 수가 다른 경우에 비해 매우 적은 것을 볼 수 있다. 그 이유는 이들 센서들의 고장 방향들 간의 각도가 120° 보다 크기 때문에 두 센서의 고장 합력이 작아져서 경계 값(threshold value)을 넘지 못했기 때문이다. 즉 고장임에도 불구하고 고장을 검출하지 못한 경우가 많은 것이다.

고장 분리에 있어서는 문제가 발생했다. 표에서는 각 센서 번호별로 분리된 횟수가 나와 있는데 첫 번째 열인 센서

1번과 2번이 고장 났을 경우 고장 검출이 되고 나서 1번과 2번 센서 중 한 센서만 분리가 시도되어 분리 횟수가 대략 반으로 나누어진 것을 볼 수 있다. 이는 단일 고장만을 가정한 분리 방법을 사용했기 때문이다. 고장 방향들 간의 각도가 큰 경우에는 분리에 있어서는 고장 나지 않은 다른 센서가 많이 분리되는 문제들이 나타났다.

이와 같은 시뮬레이션 결과들을 볼 때 이중 고장에 대한 새로운 알고리즘이 필요하며, 이중 고장에 대한 고장 형태도 새롭게 모델링 할 필요가 있음을 알 수 있다.

IV. 이중 고장을 고려한 EPSA 기법

1. 센서의 이중 고장에 대한 모델링

일반적으로 관성항법장치에서 사용하고 있는 센서는 고장 날 확률이 매우 작기 때문에 여분의 센서를 중첩해서 사용했을 경우 다수의 센서 고장을 가정하거나 고려하는 것은 현실적으로 적합하지는 않다. 그러므로 최대 2개까지의 센서 고장에 대해서 살펴보는 것만으로도 충분하다. 이와 함께 우리는 다음과 같은 센서 고장에 대한 형태를 가정해 볼 수 있다.

- 1) 정상 센서들의 측정 잡음은 고장 난 센서들의 고장 바이어스에 비해 상대적으로 작다.
- 2) 고장은 아니지만 측정 잡음보다는 상대적으로 큰 바이어스 값을 가진 이상(abnormal) 센서가 존재할 수 있다.
- 3) 센서의 고장 및 이상 발생은 합쳐서 최대 2개까지만 가능하다.

특별히 2)번에 해당하는 센서는 큰 고장은 아니지만 곧 고장이 날 가능성이 있는 이상이 발생한 센서로서 FDI 성능에 영향을 미치게 된다. 실제 이런 가능성은 매우 크다. 이와 같은 가정 하에서 센서의 이중 고장을 다음과 같이 모델링 할 수 있다.

[고장 1] 오직 센서 1개만 고장 나고, 나머지 $l-1$ 개의 센서는 정상적으로 동작한다.

[고장 2] 센서 2개가 고장 났으며, 나머지 $l-2$ 개의 센서는 정상적으로 동작한다.

[고장 3] 센서 2개가 고장 났으나, 시스템의 패리티 벡터가 경계 값을 넘지 않아 고장이 검출되지 않는다. 이런 상황은 주로 고장 방향간의 각도가 120°가 넘는 센서들 사이에 고장이 발생했을 경우에 일어난다.

[고장 4] 모든 센서가 정상이나 특별히 2개의 이상 센서에 의해 패리티 벡터가 경계 값을 넘게 되어 고장으로 판단되게 되는 경우이다.

그림 4는 이중 고장 형태를 보여주는 그림이다. 그림에서 원은 경계 값을 의미하며 화살표의 방향은 고장 방향을, 화살표의 크기는 고장 방향으로 나타나는 각 센서의 고장 바이어스의 크기를 의미한다.

2. 4가지 고장 모델링에 대한 FDI 기법 제안

새로 제안될 FDI 기법은 PSA 기법을 수정 확장한 것으로 EPSA(Extended PSA) 라고 부를 것이다. 먼저 예를 들어 총 7개의 센서를 사용하고 있다고 가정해 보자. 각 센서

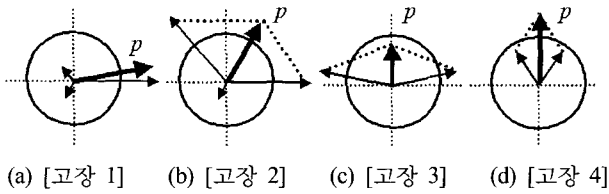


그림 4. 이중 고장 모델링.
Fig. 4. Modeling of two faults.



그림 5. 고장 난 센서와 정상 센서.
Fig. 5. Faulty sensor and normal sensors.

들을 아래 그림과 같이 표현해 볼 수 있다.(즉, $l=7$ 이다.) 여기서 검은 색 배경의 번호는 고장난 센서를 의미하며, 하얀 색 배경의 번호는 정상적으로 동작하는 센서를 의미한다. 일반적으로 l 개의 센서 중에서 $l-1$ 개를 묶을 수 있는 가지 수는 l 이다. 여기서 우리는 $l-1$ 개를 사용하여 패리티 벡터 $\bar{p} = \bar{V} \bar{m}$ 을 구할 수 있다. 이 때 \bar{V} 는 사다리꼴 행렬이어야 한다. 총 l 개의 패리티 벡터를 구할 수 있으며, 앞서와 같이 $\bar{p}^T \bar{p} > \bar{T}$ 를 사용하여 고장 여부를 판별해 본다. 이 때, \bar{T} 는 원하는 FA 값을 기준으로 구한 경계 값이다. $\bar{p}^T \bar{p} > \bar{T}$ 를 총 l 번을 수행한 후 고장으로 판별 난 개수가 n 일 때 그 값을 고장 검출 수(Fault Detection Number)라고 부르고 줄여서 $FDN=n$ 라고 표시한다. EPSA 기법은 $FDN=n$ 값을 사용하여 고장을 검출함과 동시에 고장 형태를 구분할 수 있으며, 고장 형태의 구분이 끝나면 각 형태에 따른 분리 기법을 적용하는 FDI 기법이다.

2.1 [고장 1] 에 대한 고장 검출 및 분리



먼저 7개의 센서 중에서 1개를 제외한 6개를 묶을 수 있는 가지 수는 7이다. 각각의 경우에 \bar{p} 를 구한 후, 총 7번에 걸쳐 $\bar{p}^T \bar{p} > \bar{T}$ 를 수행해 보면 $FDN=6$ 이 나오게 된다. 우리는 $\bar{p}^T \bar{p} > \bar{T}$ 가 발생하지 않았을 때 제외된 센서 1개를 고장 난 센서로 판단하고 분리를 시킨다. 일반적으로 $FDN=l-1$ 이 나오면 [고장 1]의 상황으로 판단하며, 고장 난 센서 1개를 분리시킨다.

2.2 [고장 2] 에 대한 고장 검출 및 분리



역시 먼저 7개의 센서 중에서 1개를 제외한 6개를 묶을 수 있는 가지 수는 총 7이다. 각각의 경우에 \bar{p} 를 구한 후, 총 7번에 걸쳐 $\bar{p}^T \bar{p} > \bar{T}$ 를 수행해 보면 $FDN=7$ 이

나오게 된다. 이 경우 센서 2개가 고장 난 것으로 판단한다. 일반적으로 $FDN=l$ 이 나오면 [고장 2]의 상황이며, 고장 난 센서 2개를 찾아 분리를 시키면 된다. [고장 2] 일때의 센서 분리는 다른 고장 형태일 때와는 다른 방법으로 이루어진다. 이 방법은 이중 고장에서 일반적으로 사용되던 방법으로 아래와 같다[6,7].

l 개의 센서 중에서 2개의 고장 난 센서를 찾아내는 방법은 다음과 같다. 먼저 행렬 H 에서 i 와 j 번째($i \neq j$) 행을 제거해서 얻은 행렬을 H_{ij} 라고 하자. 또한 측정치 벡터 m 에서 i 와 j 번째 성분을 제거해서 얻은 벡터를 m_{ij} 라고 하자. 즉, m_{ij} 란 센서 두 개를 제거하고 남은 센서의 측정치 벡터를 의미한다. l 개의 센서 중에서 2개를 선택한 후 제거함으로써 H_{ij} 와 m_{ij} 를 얻을 수 있으며, 얻을 수 있는 경우의 수는 C_2 이다. 이렇게 임의의 센서 2개를 제거하고 얻은 H_{ij} 에 대해 다음 두 조건을 만족하는 V_{ij} 를 구한다. 즉, V_{ij} 는 다음 두 성질을 만족하는 사다리꼴 행렬이다.

$$V_{ij} H_{ij} = 0, \quad V_{ij} V_{ij}^T = I_{l-n-2} \tag{5}$$

V_{ij} , m_{ij} 로부터 $p_{ij} = V_{ij} m_{ij}$ 를 만족하는 패리티 벡터를 구한다. $x_{ij}^2 = p_{ij}^T p_{ij}$ 라고 x_{ij}^2 를 정의해 보자. 만약 p_{ij} 를 구할 때 고장 난 센서가 포함되어 있다면 p_{ij} 의 크기가 커질 것이고, 만약 고장 난 센서가 모두 분리된 경우라면 p_{ij} 값이 작을 것이다.

그러므로 $\min_{i,j} x_{ij}^2 = \min (p_{ij}^T p_{ij}), i \neq j, 1 \leq i, j \leq l$ 와 같이 x_{ij}^2 의 최소 값을 구하면 이 때의 i, j 번째 센서가 고장 난 센서가 된다. 또 다른 선택적인 방법으로는 Asok Ray가 제안한 방법[8]으로 2개 이상의 센서 고장이 발생했을 때, 즉 $FDN=l$ 이었을 때, 1개의 센서 측정치를 제외한 나머지 센서들로 \bar{p} 를 $l-1$ 개 구한 다음, $\min |\bar{p}|$ 를 구해서 이 \bar{p} 를 구할 때 제외된 측정치가 가장 고장 난 가능성이 높은 것으로 간주하고 이 센서를 분리시킨다. 다시 이런 방식을 반복해서 계속 고장 난 센서를 분리시킨다. 그러나 Asok Ray의 논문에서는 [고장 3]의 경우를 고려하지 않고 이 방법을 적용하고 있다. 그러므로 이와 같은 방식을 적용하면, [고장 2]는 어느 정도 해결할 수 있지만 [고장 3]을 구별할 수가 없다. 또한 이 방식을 사용하면 2개의 고장 난 센서를 분리할 때 작업을 두 번 해야 하는 불편함이 있다.

2.3 [고장 3] 에 대한 고장 검출 및 분리



역시 먼저 7개의 센서 중에서 1개를 제외한 6개를 묶을 수 있는 가지 수는 총 7이다. 각각의 경우에 \bar{p} 를 구한 후, 총 7번에 걸쳐 $\bar{p}^T \bar{p} > \bar{T}$ 를 수행해 보면 $FDN=2$ 가 나오게 된다. 위 그림에서 1번과 2번 센서는 각각 있을 때는 경계 값을 넘는 고장 센서이지만 두 개가 함께 묶여서 패리

터 벡터를 구성하게 되면 패리티 벡터가 경계 값을 넘지 않게 되는 특별한 경우이다. 일반적으로 $FDN=2$ 가 나오면 [고장 3]의 상황이다. 고장 난 센서의 분리는 $\bar{p}^T \bar{p} > \bar{T}$ 를 수행했을 때 고장이 검출될 때마다 제외된 센서가 고장이며, 이런 센서 2개를 찾아 분리시키면 된다.

2.4 [고장 4] 에 대한 고장 검출 및 분리



역시 먼저 7개의 센서 중에서 1개를 제외한 6개를 묶을 수 있는 가지 수는 총 7이다. 각각의 경우에 \bar{p} 를 구한 후, 총 7번에 걸쳐 $\bar{p}^T \bar{p} > \bar{T}$ 를 수행해 보면 $FDN=5$ 가 나오게 된다. 위 그림에서 1번과 2번 센서는 혼자 있을 때는 경계 값을 넘지 않는 이상 센서이지만 두 개가 함께 묶여서 패리티 벡터를 구성하게 되면 패리티 벡터가 경계 값을 넘게 된다. 고장 난 센서는 없지만 이상 센서가 2개 존재함을 알 수 있다. 일반적으로 $FDN=l-2$ 가 나오면 [고장 4]의 상황이다. $\bar{p}^T \bar{p} > \bar{T}$ 를 수행 시 고장이 검출 안 될 때 제외된 센서들이 이상 센서이므로 이런 센서 2개를 찾아 분리시키면 된다.

3 센서의 이중 고장을 고려한 FDI 기법

전체적인 알고리즘을 정리해보면 아래 그림과 같다.

우선 $\bar{p}^T \bar{p} > \bar{T}$ 를 수행하여 FDN 값을 구한다. 그 다음 FDN 값을 비교하면서 FDI를 수행한다. FDN 값에 따라 $FDN=l, FDN=l-1, FDN=l-2, FDN=2, FDN=0$ 이렇게 5가지 경우로 구분이 된다. FDN 값이 예상되는 5 가지 값이 아닌 다른 값이 나올 경우, 3개 이상의 고장이 발생했거나 오류가 생긴 것이므로 ERROR 신호를 보내준다. 고장 검출 및 분리에 필요한 센서의 최소수는 정리 1, 정리 2를 통해 알 수 있다.

정리 1 : n 차원의 변수를 측정하기 위해 l 개의 여분의 센서를 사용하는 시스템이 존재한다고 가정하자. PSA 기법

을 사용할 경우 단일 고장을 검출 및 분리 할 수 있는 고장 검출 및 분리 조건은 $l-n \geq 2$ 이다.

증명 : 일반적으로 PSA 기법을 사용할 경우 $p = Vm$ 을 구해야 한다. 이 때 V 는 차원이 $(l-n) \times l$ 인 사다리꼴 행렬이다. 여기서 사다리꼴 행렬이 존재하기 위해서는 $l-n \geq 2$ 조건을 만족해야만 한다. PSA에서 행렬 V 의 행이 2행 이상이 되지 않으면 고장 검출 또는 분리를 할 수가 없다. 그 이유는 V 의 행이 1행만 있을 경우 고장의 영향이 p 에 나타나지 않기 때문이다. (3)에서 $p = V\epsilon + Vf$ 임을 알 수 있는데 V 의 행이 1행만 있을 경우 고장 영향을 반영하는 벡터 f 가 0이 아님에도 불구하고 Vf 의 값이 0이 되어버리는 상황이 발생하므로 고장 검출 또는 분리가 불가능해진다. 결론적으로 $l-n \geq 2$ 조건을 만족하면 단일 고장 상황에서 고장 검출 및 분리를 할 수 있다. ■

정리 2 : n 차원의 변수를 측정하기 위해 l 개의 여분의 센서를 사용하는 시스템이 존재한다고 가정하자. EPSA 기법을 사용할 경우, 단일 고장 및 이중 고장을 검출 할 수 있는 고장 검출 조건은 $l-n \geq 3$ 이며, 단일 고장 및 이중 고장을 검출 및 분리 할 수 있는 고장 검출 및 분리 조건은 $l-n \geq 4$ 이다.

증명 : 일반적으로 EPSA 기법을 사용할 경우 FDN 을 구하기 위해 \bar{p} 를 구해야만 한다. 여기서 $\bar{p} = \bar{V}\bar{m}$ 의 \bar{V} 는 차원이 $(l-n-1) \times (l-1)$ 인 행렬이며, 행렬 \bar{V} 가 존재하기 위해서는 $l-n-1 \geq 2$ 조건 즉, $l-n \geq 3$ 을 만족해야만 한다. 이 조건이 만족하면 \bar{p} 를 얻을 수 있고 FDN 값을 통해 고장을 검출 할 수가 있다.

또한 [고장 2]가 체크된 경우에는 고장 센서 분리를 위해 p_{ij} 를 구해야 하는데 이때의 p_{ij} 는 $(l-n-2) \times 1$ 벡터이다. 그러므로 이 값이 의미가 있기 위해서는 $(l-n-2) \geq 1$ 를 만족해야만 한다. 즉, $l-n \geq 3$ 을 만족해야만 한다. 다음으로 p_{ij} 를 구하기 위해 V_{ij} 를 계산하는데 V_{ij} 차원이 $(l-n-2) \times (l-2)$ 이다. 여기서 V_{ij} 는 반드시 사다리꼴(trapezoidal) 행렬이어야 하므로 $l-n-2 \geq 2$ 을 만족해야만 한다. 즉, $l-n \geq 4$ 이다. 그러므로 센서 분리가 가능한 최소 센서 개수의 조건은 $l-n \geq 4$ 이다. 관성항법 장치와 같이 $n=3$ 인 경우에는 최소한 6개 이상의 센서를 사용해야 이중 고장일 경우 고장 검출이 가능하며, 7개 이상의 센서를 사용할 경우에는 고장 분리도 가능하다. 즉, 6개일 때는 두 개의 센서가 고장 났음을 검출할 수는 있지만 정확한 분리를 할 수는 없다. ■

관찰 1 : 본 논문에서 고려한 [고장 3]의 형태는 패리티 벡터의 고장 방향이 서로 120° 이상 벌어졌을 경우에만 발생할 수 있다. 관성항법시스템과 같이 센서의 개수가 6개 이상 사용될 경우에는 [고장 3]의 상황이 항상 발생할 수 있음을 쉽게 알 수 있다.

4. 제안된 FDI 기법에서 사용할 경계 값 결정

위에서 제시한 이중 고장을 고려한 새로운 알고리즘을 적용할 경우, l 개의 센서에 대한 패리티 벡터를 사용하는 것이 아니라 $l-1$ 개에 대한 패리티 벡터를 사용하게 되므

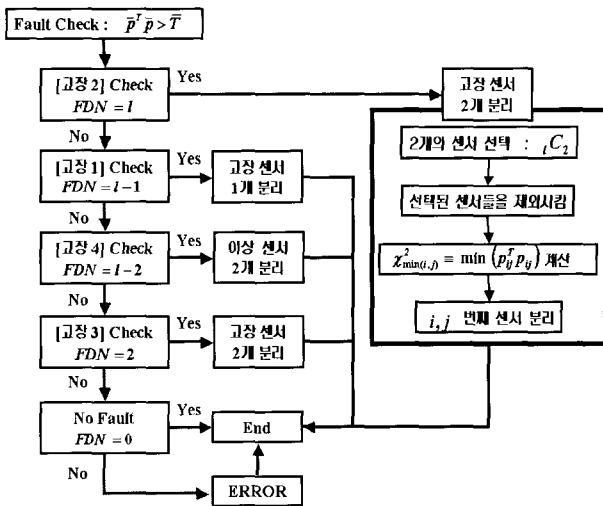


그림 6. 이중 고장을 고려한 EPSA 기법.
Fig. 6. EPSA method considering two faults.

로, 고장에 대한 경계 값 \bar{T} 를 다음과 같이 정할 수 있다. 먼저 $l-1$ 센서에 대한 고장검출함수 $\bar{p}^T \bar{p}$ 가 $(l-n-1)$ DOF(degrees of freedom) 을 가진 χ^2 분포를 이룬다. 이 때 χ^2 분포표로부터 \bar{T} 를 얻기 위해 필요한 FA를 \overline{FA} 라고 정의하자. 그리고 기존 센서 l 개의 전체시스템에서의 설계자가 원하는 FA값은 FA_l 이라고 정의하자. EPSA 기법에서 각각의 고장이 발생할 확률은 다음과 같다.

- 1) 고장 1 발생 확률 : $\overline{FA}^{l-1}(1-\overline{FA}) \times_l C_{l-1}$
- 2) 고장 2 발생 확률 : $\overline{FA}^l \times_l C_l$
- 3) 고장 3 발생 확률 : $\overline{FA}^2(1-\overline{FA})^{l-2} \times_l C_2$
- 4) 고장 4 발생 확률 : $\overline{FA}^{l-2}(1-\overline{FA})^2 \times_l C_{l-2}$

그러므로 설계자가 원하는 FA_l 을 정한 후, 아래 (6)을 만족하는 \overline{FA} 값을 구하여서 χ^2 분포표로부터 \bar{T} 를 구하면 된다.

$$FA_l = \{ \overline{FA}^{l-1}(1-\overline{FA}) \times_l C_{l-1} \} + \{ \overline{FA}^l \} + \{ \overline{FA}^2(1-\overline{FA})^{l-2} \times_l C_2 \} + \{ \overline{FA}^{l-2}(1-\overline{FA})^2 \times_l C_{l-2} \} \quad (6)$$

$FA_l=0.01$ 일 때의 경계 값은 $\bar{T}=10.5$ 임을 알 수 있다. 표 3은 $\bar{T}=10.5$ 일 때의 EPSA의 시뮬레이션 수행 결과이며, 수행 횟수는 동일하게 10000번이다.

V. 이중 고장을 고려한 EPSA 기법의 성능분석

이중 고장을 고려한 EPSA 기법을 검증하기 위해 고장 바이어스를 총 10000번 인가하면서 몬테칼로 시뮬레이션을 수행한다. 경계 값은 앞에서 구한 $\bar{T}=10.5$ 를 사용한다.

1. 단일 고장시 EPSA 성능

먼저 EPSA 기법의 성능을 알아보기 위해 단일 고장 상황을 구현한다. 센서 1번에 F/N Ratio를 증가시키면서 고장 검출 및 분리 확률 값을 구해보면 그림 7과 같다. F/N Ratio 값이 커짐에 따라 고장 검출 확률이 커져가고 있으며, 고장이 검출된 이후 대부분 고장 난 센서가 정확하게 분리되고 있다. 단일 고장 상황에서의 PSA 성능과 비교해 볼 때 EPSA의 FDI 성능이 PSA의 FDI 성능과 거의 비슷함을 알 수 있다.

2. 이중 고장시 EPSA 성능

센서의 이중 고장 상황을 살펴보기 위해 센서 1번과 센서 3번에 다양한 고장 바이어스 값을 동일하게 인가시켜 얻은 결과는 그림 8과 같다. 이중 고장인 경우 고장 검출 성능은 단일 고장에 비해 상대적으로 우수하며, 이는 고장 신호가 두 군데에서 나타나기 때문에 그 영향이 단일 고장 때보다 크기 때문이다. 분리 성능은 단일 고장 때와 비슷한 기울기를 그리며 상승하다가 90% 이상부터는 다소 기울기가 작아지면서 100%로 천천히 수렴하는 경향을 보인다.

3. FDI 성능에 미치는 고장 방향의 영향

센서들의 고장 방향간의 각도가 120° 를 넘는 경우에는 FDI 성능이 다소 떨어지는 것을 표 4를 통하여 알 수 있다.

표 3. FA = 0.01을 만족하는 경계 값을 구한 결과.

Table 3. Threshold value to satisfy FA=0.01.

\bar{T}	고장1	고장2	고장3	고장4	총 고장 횟수	False Alarm
10.5	6	0	45	52	103	0.01

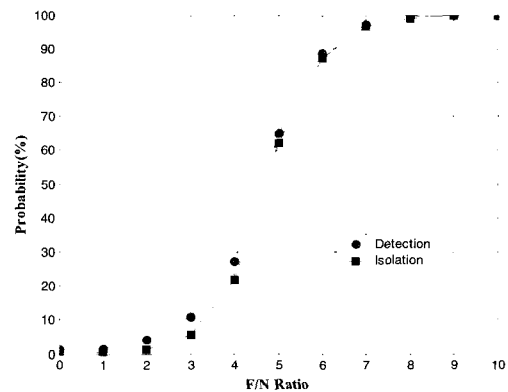


그림 7. 단일 고장일 때의 EPSA 기법의 FDI 결과.

Fig. 7. FDI result of EPSA (CASE 1).

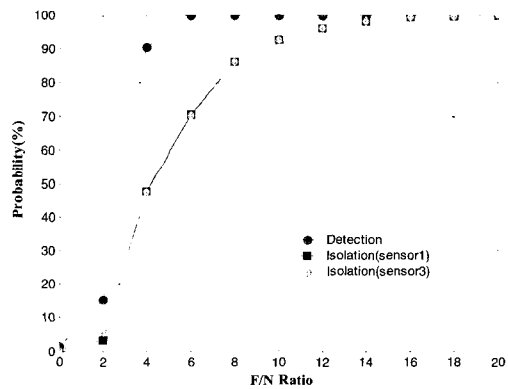


그림 8. 이중 고장일 때의 EPSA 기법의 FDI 결과.

Fig. 8. FDI result of EPSA (CASE 2).

표 4. 고장 방향의 각도에 따른 FDI 결과.

Table 4. FDI results in each fault direction.

두 개의 고장 센서 번호		1-2	1-3	1-4	1-5	1-6	1-7
각 유형별 검출 수	고장 1	522	3	1051	1797	3	553
	고장 2	<u>9477</u>	<u>9997</u>	<u>8891</u>	<u>8035</u>	<u>9997</u>	<u>9447</u>
	고장 3	0	0	1	5	0	0
	고장 4	1	0	39	126	0	0
센서 분리 횟수	1번	<u>8625</u>	<u>9026</u>	<u>6723</u>	<u>4773</u>	<u>8962</u>	<u>8599</u>
	2번	<u>8631</u>	55	109	<u>4171</u>	1013	41
	3번	49	<u>9025</u>	196	151	8	367
	4번	366	903	<u>6668</u>	<u>2292</u>	21	1398
	5번	1368	16	<u>2909</u>	<u>4665</u>	1016	400
	6번	392	16	217	73	<u>8977</u>	37
	7번	47	956	<u>2091</u>	2004	0	<u>8605</u>

이 표는 두 개의 센서에 고장 바이어스(F/N Ratio 9)를 인가한 후 살펴본 것으로 1번 센서와 다른 하나의 센서가 고장 났을 때의 결과를 정리해 놓은 것이다. 1번 센서와 고장 방향의 각도가 가장 작은 3번과 6번 센서의 경우 함께 고장 나더라도 거의 대부분이 검출되고 센서 분리도 거의 대부분 제대로 이루어지고 있다. 이보다 고장 방향 각도가 조금 더 큰 2번과 7번 센서의 경우도 조금 성능은 떨어지지만 비슷한 결과를 보여주고 있다. 하지만 1번 센서의 고장 방향과 각도가 가장 크게 벌어진 4번과 5번 센서의 경우 고장 검출 성능도 떨어지고 분리에 있어서도 다른 정상 센서들을 분리함으로써 성능이 떨어짐을 알 수 있다. 일반적으로 고장 방향 각도가 큰 센서들이 함께 고장 날 경우 이와 같이 FDI 성능이 떨어진다. EPSA는 넓게 벌어진 고장 방향으로 인해 [고장 3] 형태가 검출되지 못하던 것을 고려하여 보완하였다.

VI. 결론

기존의 FDI 기법들은 대부분 센서의 단일 고장만을 고려하기 때문에 이중 고장이 발생했을 경우에는 FDI 를 수행할 수가 없다. 예를 들어 대표적인 FDI 기법인 PSA 기법의 경우 이중 고장에 대한 검출 성능이 매우 좋음에도 불구하고 고장 분리에 있어서는 매우 나쁜 성능을 보여주고 있으므로 이중 고장 상황을 고려할 때는 전혀 사용할 수 없다. 이는 기존에 제안된 대부분의 FDI 기법들이 공통적으로 가지고 있는 문제점이다. 이에 반해 본 논문에서 제안한 EPSA라는 FDI 기법은 이중 고장의 형태를 4가지로 모델링을 한 후 각 고장 형태에 대한 고장 검출 방법 및 고장난 센서의 분리 방법을 제시하고 있으며 시뮬레이션을 통해 그 성능을 보여주고 있다. EPSA는 각 고장 형태별로 검출을 해주며, 각 경우에 따라 센서 분리 신호를 보내주므로 좀 더 명확하게 고장 상황을 파악할 수 있다. 또한 PSA 기법과의 성능을 비교해 볼 때 단일 고장의 경우 PSA와 거의 비슷하거나 조금 더 향상된 검출 및 분리 성능을 보여주고 있으며, 이중 고장의 경우에는 PSA와 거의 동일한 검출 성능을 보임과 동시에 PSA와는 다르게 매우 좋은 분리 성능을 보여준다.

추가적으로 EPSA 기법에서는 고장 방향 사이의 각도가 클 경우 발생하는 [고장 3] 을 고려함으로써 조금이나마 고장 방향에 의한 영향을 줄였다. 그러나 대체적으로 고장 방향 사이의 각도가 120° 보다 크면 FDI 성능이 다른 경우

에 비해 떨어지므로 이에 대한 성능 향상 연구가 요구된다.

이와 같은 문제점을 해결하기 위해서는 한순간의 측정치를 이용하기보다는 일정 시간 동안의 측정치를 이용하여 FDI 기법의 성능 개선을 도모해 보는 연구를 생각해 볼 수 있다. 또한 최근에 많이 연구되고 있는 시스템의 동역학 식을 이용한 모델 기반 고장 진단 기법을 이용하여 성능 개선을 시도해 볼 수도 있을 것이다.

참고문헌

- [1] J. E. Potter and M. C. Suman, "Thresholdless redundancy management with arrays of skewed instruments", *Integrity in Electronic Flight Control Systems*. NATO AGARDOGRAPH-224, pp. 15-1 to 15-25. 1977.
- [2] A. Ray and R. Luck, "An Introduction to Sensor Signal Validation in Redundant Measurement Systems", *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 11, no. 2, pp. 44-49, 1991.
- [3] A. Ray and M. Desai, "A redundancy management procedure for fault detection and isolation", *J. Dynamic Systems, Measurement, and Control*, pp. 248-254, September, 1986.
- [4] K. C. Daly, E. Gai and J. V. Harrison, "Generalized likelihood test for FDI in redundant sensor configuration", *Journal of Guidance and Control*, vol. 2, no. 1, pp. 9-17, 1979.
- [5] H. Jin and H. Y. Zhang, "Optimal parity vector sensitive to designated sensor fault", *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 35, no. 4, pp. 1122-1128, October, 1999.
- [6] 유창선, 이상정, "GPS RAIM에서의 2개 파라미터 고장 진단에 대한 연구", *한국 자동제어 학술회의 논문집*, October, 2000.
- [7] R. G. Brown, "Solution of the two-failure GPS RAIM problem under worst-case bias conditions : parity space approach", *Journal of the ION*, vol. 44, no. 4, pp. 425-431, Winter, 1997-1998.
- [8] A. Ray, M. Desai and J. Deyst, "Fault detection and isolation in a nuclear reactor", *J. Energy*, vol. 7, pp. 79-85, Jan.-Feb., 1983.



김 광 훈

1973년 8월 15일생. 1996년 중앙대학교 공과대학 제어계측공학과 졸업. 1999년 한국과학기술원 전기및전자공학과 졸업(석사) 2001년~현재 서울대학교 전기컴퓨터공학부 박사과정 재학 중. 연구 관심분야는 관성항법시스템

개발, 고장검출기법, 이득 스케줄링 제어 기법.



박 찬 국

1961년 9월 13일생. 1985년 서울대학교 공과대학 제어계측공학과 졸업. 1987년 동 대학원 졸업(석사). 1993년 동 대학원 졸업(공학박사). 1993년 서울대학교 제어계측신기술연구소 박사후 연구원. 1994년~2002년 광운대학교

정보제어공학과 부교수. 1998년 미국 UCLA 기계항공공학과 방문연구원. 1994~현재 서울대학교 자동제어특화연구소 책임연구원. 2003년 현재 서울대학교 기계항공공학부 부교수. 연구 관심분야는 관성항법시스템 개발, GPS/INS 결합기법, MEMS IMU 응용, 칼만필터링, 센서고장검출.



이 장 규

1946년 3월 28일생. 1971년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1974년 Univ. of Pittsburgh 전기공학과 졸업(석사). 1977년 Univ. of Pittsburgh 전기공학과 졸업(공학박사). 1977년 - 1981년 The Analytic Sciences Corporation 연구원

(Technical Staff). 1981년~1982년 Charles Stark Draper Laboratory 연구원(Technical Staff). 1982년~현재 서울대학교 전기·컴퓨터공학부 교수. 1994년~현재 서울대 자동제어특화연구소 소장. 연구 관심분야는 추정이론, 관성항법 센서 및 시스템, GPS, 무선측위 시스템.