

論文

유사측도를 이용한 무인기의 고장진단 및 검출

박옥제*, 이상혁*

Fault Detection and Identification of Uninhabited Aerial Vehicle
using Similarity Measure

Wook-Je Park*, Sang-Hyuk Lee*

ABSTRACT

It is recognized that the control surface fault is detected by monitoring the value of the coefficients due to the control surface deviation. It is found out the control surface stuck position by comparing the trim value with the reference value. To detect and isolate the fault, two mixed methods apply to the real-time parameter estimation and similarity measure. If the scatter of aerodynamic coefficients for the fault and normal are closing nearly, fault decision is difficult. Applying similarity measure to decide for fault or not, it makes a clear and easy distinction between fault and normal. Low power processor is applied to the real-time parameter estimator and computation of similarity measure.

Key Words : Fault Detect(고장 진단), Similarity Measure(유사측도), Real-time Parameter Estimation(실시간 미계수추정), Uninhabited Aerial Vehicle(무인기), DURUMI-II

1. 서 론

무인항공기의 고장허용 비행제어 시스템에 관한 연구[1]는 크게 두 가지 분야로 나뉜다. 실시간으로 비행체의 고장검출 및 분리하는 연구 분야와 그에 따른 실시간 제어기 재설계[2,3]하는 분야로 구성된다. 고장진단 및 검출 기술은 다양한 방법으로 연구가 수행되어 왔다. 본 연구에서 제안된 고장 검출 및 분리(FDI : Failure Detection Isolation)방법은 실시간 미계수 추정법[4-9]과 유사측도[10]를 활용하는 것이다. 유사측도(Similarity Measure)법에 의한 고장 진단기법은 여러 가지 이점을 제공한다. 우선, 시스템의 변경이 필요하지 않고, 단지 소프트웨어적인 알

고리즘 추가로 고장진단이 가능하다. 이미 개발된 항공기에서 고장진단을 위해 시스템 변경할 경우에는 많은 추가 비용이 필요하게 된다. 소형 비행체에서는 시스템 변경 비용만이 문제가 아니라, 센서 탑재에 따라 무게도 추가되며, 만약 무게에 민감한 비행체라면 시스템 변경은 불가능하게 된다. 이러한 시스템에 실시간 미계수 추정기법을 통하여 미계수를 추출하고, 정상과 고장에 대한 통계치에 의거하여 유사측도 기법을 이용한다면, 각 운동방향에 대한 조종면의 고장 유무를 판별이 가능해지며, 전투 중 조종면의 일부분이 손실된 경우에도 판별이 용이해진다. 하지만 실시간 미계수 추정기법은 미계수를 추정하기 위해 독특한 기동을 해야만 한다. 특정한 조종입력[9]을 인가하고 그 응답에 따라 미계수를 추정하는 것이다. 반복적으로 조종입력을 인가하며, 그에 따라 비행체는 상하 혹은 좌우로 매우 불쾌한 기동을 반복적으로 수행한다. 따라서 여객기와 같은 일반인 탑승자가 있는 경우는 적용할 수가 없

2011년 3월 23일 접수 ~ 2011년 6월 27일 심사완료

* 인하대학교 정보전자공동연구소

연락처, E-mail : leehyuk@inha.ac.kr

인천광역시 남구 용현동 253

다. 유인항공기 보다 무인항공기에 매우 적합한 방법이다.

무인항공기 고장진단 문제를 해결하기 위하여 데이터간의 확실성과 불확실성의 해석을 퍼지 엔트로피와 유사측도를 통하여 해결하였다. 신뢰성 있는 데이터의 추출을 통하여 시스템 모델링 또는 데이터 분석 등의 분야에 하기 위해서는 유사측도의 구성이 요구된다. 유사측도의 구성을 통하여 패턴인식, 데이터 클러스터링, 그리고 정보 예측 등의 분야에 적용할 수 있다. 계량적 연산을 위한 연구는 데이터의 불확실성을 계산하는 퍼지 엔트로피 구성에 대한 부분과, 데이터간의 유사측도를 구성하는 부분으로 분류할 수 있다 [11-21]. 이중 퍼지 엔트로피의 구성은 퍼지 집합에 대하여 퍼지 엔트로피의 정의를 만족하는 형태로 구성할 수 있으며, 보편적으로 거리측도를 이용한 형태를 적용하였다[11-14]. 유사측도 역시 거리측도를 이용하면 보다 구체적인 형태의 유사측도 구성이 용이해진다[16]. 또한 소속 함수의 형태가 삼각형 또는 마름모꼴의 경우, 퍼지 넘버를 이용한 유사측도의 구성에 대한 연구도 있다 [17-21]. 그러나 퍼지 넘버를 이용하면 소속 함수의 형태에 제한을 받아서 일반적인 퍼지집합의 경우 적용하기에 어려움이 따른다.

실시간 미계수 추정기법을 적용하여 무인항공기의 고장진단 시스템을 구성하였고, 정확한 고장을 결정하기 위해 퍼지집합에 대한 유사측도를 적용하여 소속함수를 구성하고, 실시간으로 최신의 자료로 갱신되는 시스템을 구성하였다.

2. 고장진단을 위한 시스템

2.1 실시간 미계수 추정기

초기연구의 비행제어컴퓨터는 PC104기반의 MS-DOS를 사용하는 시스템으로 매우 크고 무거우며 소비전력이 큰 단점이 있다. MS-DOS를 사용함으로 프로그램의 호환성은 큰 편이었다. 또 다른 연구에서 개발되었던 실시간 미계수 추정기 [7]는 32비트 부동소수점 연산이 가능한 DSP을 이용하므로 성능은 고성능이었으나, 주요 소자가 비교적 크며, 소비전력을 많이 사용하는 단점이 있다. 새로 개발된 실시간 미계수 추정기는 비행제어컴퓨터를 겸할 수 있으며, ARM을 기반으로 하는 저전력 CPU로 설계하였다. 또한 시스템의 안정성을 위하여 DUAL CPU로 구성하였다. 주요 사양과 형상을 Table 1과 Fig. 1에 나타내었다. Dual ARM Core를 기반으로 설계된 소형 실

시간 미계수 추정기는 각각의 CPU가 비행제어기와 실시간 미계수 추정기로 나뉘어 작동하도록 구성하였다. 이 두 CPU는 SPI나 TWI 통신을 이용하여 Data를 교환하며, 미계수 추정기에서는 IMU에서 들어오는 비행정보를 실시간으로 미계수 추정과 유사측도를 계산하며, 그 결과에 따른 고장 유무를 판별하여 비행제어기로 정보를 제공한다. 또한 미계수 추정기에 제공된 정보와 동일한 비행정보가 비행제어기에도 입력된다. 조종입력은 PWM 신호 발생기를 통하여 조종면을 움직이도록 설계되었다. 구성도는 Fig. 2와 같다.

Table 1. Specifications of Real-Time Parameter Estimator

CPU	AT91SAM7S256 x2
Power Consumption	20mA at full speed (48MHz)
Interface	SPI, TWI, USART x2, USB2.0
Data Recording	Micro SD using USART
Servo Control	PWM Generator using C8501F047
Dimension	75mm (L) x 31mm(H)



Fig. 1 ARM 코어를 기반으로 한 실시간 미계수 추정기

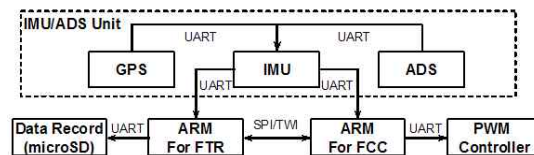


Fig. 2 시스템 구성도

2.2 고장진단을 위한 시스템 구성

고장진단에 사용된 무인항공기는 한국항공우주연구원에서 개발한 두루미-II로 조종면의 이중화를 통하여, 정상 상태의 비행 시험과 비행 중 조종면 고장을 가정한 상태의 비행 시험을 수행하였고, 이 때 획득된 자료를 이용하였다. 새로이 구성된 진단 시스템은 실제로 비행시험을 통하여 검증하지 않고, 우선적으로 지상에서 가상의 조건하에 수행되었다. Fig. 2에 도시된 구성과 동일하나 USART와 연결된 IMU/ADS Unit 대신에

동일한 정보를 제공하는 가상의 Machine과 연결하여 기 수행되어 저장되어 있는 비행시험 자료를 Random하게 읽고 자료를 제공한다. 제공되는 자료는 정상 비행자료, 조종면이 고정된 비행자료, 조종입력이 실패한 자료 등으로 구분되어 제공된다. 이는 실제 비행시험을 통하여 얻어진 자료이므로, 실제성을 갖는다.

3. 실시간 미계수 추정을 위한 모델링

시불변 시스템으로 가정하고, 세로운동에 대한 비행기 모델은 다음과 같이 표현된다.

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (1)$$

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

여기서, $x = [\alpha, u, q, \theta]^T$, $u = \delta_e$,

$$A = \begin{bmatrix} X_u & X_\alpha & 0 & -g\cos\theta_0 \\ Z_u & Z_\alpha & 1 & 0 \\ \frac{u_0}{u_0} & \frac{u_0}{u_0} & & \\ M_u + \frac{M_\alpha}{u_0} Z_\alpha & M_\alpha + \frac{M_\alpha}{u_0} Z_\alpha & M_q + M_\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} X_{\delta_e} & Z_{\delta_e} \\ \frac{u_0}{u_0} & M_{\delta_e} + \frac{M_\alpha}{u_0} Z_{\delta_e} & 0 \end{bmatrix}, \quad C = I \quad \text{그리고}$$

$D = 0$ 이다.

식 (1)과 (2)의 상태방정식을 Fourier 변환을 적용하면 다음과 같다.

$$j\omega \tilde{x}(\omega) = A\tilde{x}(\omega) + B\tilde{u}(\omega) \quad (3)$$

$$\tilde{y}(\omega) = C\tilde{x}(\omega) + D\tilde{u}(\omega) \quad (4)$$

식 (3)의 k 번째 상태벡터에 대한 가격함수는 다음과 같이 표현된다.

$$J_k = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^m \left| j\omega_n \tilde{x}(\omega_n) - A_k \tilde{x}(\omega_n) - B_k \tilde{u}(\omega_n) \right|^2 \quad (5)$$

여기서, A_k, B_k 는 각각 A, B 행렬의 k 번째 행이고, $\tilde{x}(\omega_n)$ 은 ω_n 에 \tilde{x} 대한 k 번째 요소이다. $\tilde{x}(\omega_n)$ 와 $\tilde{u}(\omega_n)$ 은 주파수 ω_n 에 대한 상태 및 제어 벡터의 Fourier 변환을 의미한다. m 은 관심을 가지고 있는 주파수의 개수를 나타낸다. 각각의 변환된 변수들은 모두 주파수의 함수이다.

4. 유사측도

이제 우리는 거리측도를 이용한 유사측도 구성을 위하여 먼저 유사측도에 대한 정의를 소개한다.

정의 4.1 [11] 퍼지 집합 $F(X)$ 또는 일반집합 $P(X)$ 에 대하여 $s: F^2(X) \rightarrow R^+$ 와 같은 함수가 성립하고 다음과 같은 특징을 만족하면 s 는 유사측도라고 정의 한다:

$$(S1) \quad s(A, B) = s(B, A), \forall A, B \in F(X)$$

$$(S2) \quad s(D, D^C) = 0, \forall D \in P(X)$$

$$(S3) \quad s(C, C) = \max_{A, B \in F(X)} s(A, B), \forall C \in F(X)$$

$$(S4) \quad \forall A, B, C \in F(X) \text{ 대하여 } A \subset B \subset C \text{ 이면 } s(A, B) \geq s(A, C) \text{ 이고 } s(B, C) \geq s(A, C) \text{ 이다.}$$

유사측도 정의로부터 다음의 정리에서 개선된 유사측도를 제안한다. 전체 면적에서 확실성에 비례한 면적을 유사측도로 간주하면 다음과 같이 유사측도를 구성한다.

정리 4.1 어떤 집합 $A, B \in F(X)$ 또는 $P(X)$ 에 대하여 Hamming 거리를 만족하면 다음의 두식은 집합 A 와 B 에 대하여 유사측도를 만족한다.

$$s(A, B) = 2 - d((A \cap B), [1]_X) - d((A \cup B), [0]_X) \quad (6)$$

$$s(A, B) = 1 - d(A, A \cap B) - d(B, A \cap B) \quad (7)$$

유사 측도의 식(6)과 (7)에 대한 증명은 문헌에서 확인할 수 있다[14,15].

제안된 유사측도에서 퍼지 소속 함수 A 와 B 의 거리 측정은 Hamming 거리측정을 사용한다. 일반적으로 Hamming 거리는 Fuzzy set A 와 B 사이의 거리측정을 사용한다.

$$d(A, B) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\mu_A(x_i) - \mu_B(x_i)|$$

여기서 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, $|\kappa|$ 는 κ 의 절대값이고, μ_A 는 $A \in F(X)$ 의 소속 함수이다.

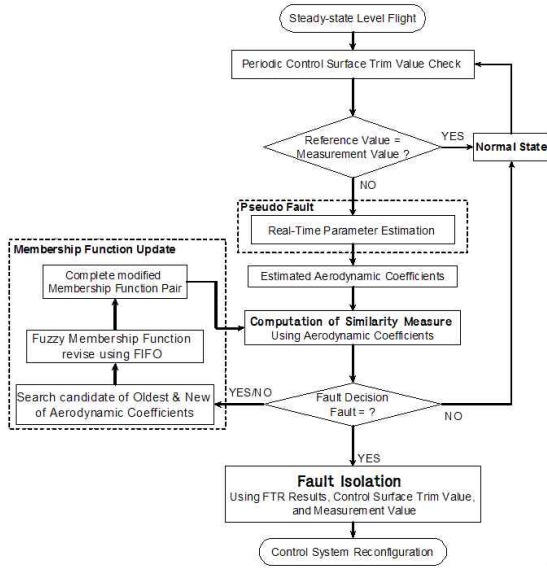


Fig. 3 고장진단 및 분리절차

고장진단 및 분리 과정을 Fig. 3에 도시하였다. 고장진단 과정에 유사도 계산과 검출을 제한하였다. 그림 왼쪽의 소속함수 갱신에 대한 알고리즘이 고려되어 있다. 소속함수는 초기의 기준 데이터를 이용하여 정규화 되어있고, 소속함수에 고장유무가 판별된 후 고장유무에 따라 신규 데이터가 소속되어있는 함수에서 소속값의 위치를 찾고, 가장 오래된 소속함수 값을 FIFO(First In First Out) 개념으로 제거하고, 소속함수는 새로운 자료를 적용하여 갱신된다.

유사도 계산은 유사측도로 유도되고, 검출 부분은 더 많은 분석자료와 고려사항이 필요하다. 퍼지 소속함수 구성을 위해 정상상태의 30개 자료와 고장가정상상태의 72개 자료를 사용하였다. 세로운동과 관련된 미계수 C_{m_s} , C_{m_a} , C_{L_a} 을 8개의 그룹으로 나누고, 정규화하였다. 그림 4에서는 정상상태와 고장상태의 값이 서로 교차되지 않으나, C_{m_a} 와 C_{L_a} 는 두 상태가 교차되어 나타난다. 그러므로, C_{m_a} 와 C_{L_a} 만으로 미계수의 유사측도를 구하는 것이 용이하지 못하다. C_{m_s} 는 Fig. 4(a)에 도시된 것처럼 정상과 고장을 구분할 수 있도록 도와준다.

C_{m_s} , C_{m_a} , C_{L_a} 에 대한 정상과 고장의 퍼지 소속함수를 Fig. 5에 도시하였다.

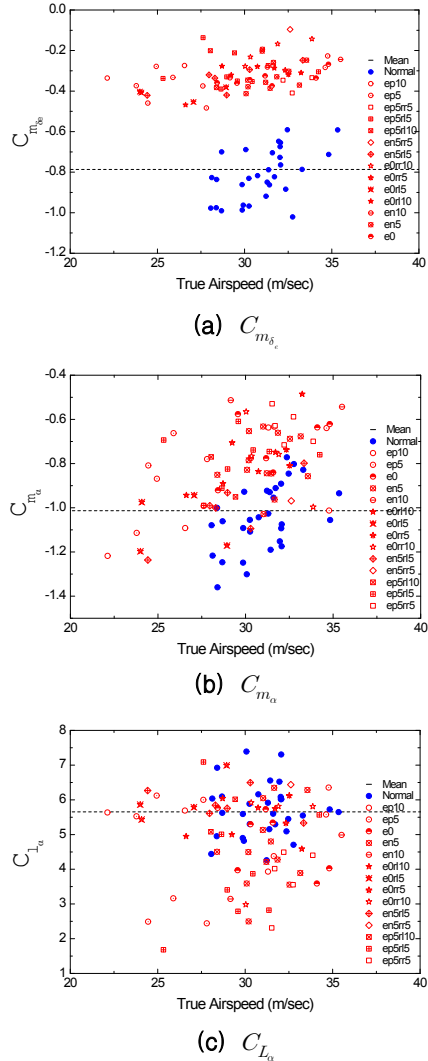


Fig. 4. C_{m_s} , C_{m_a} , C_{L_a} 계수의 산포도

5. 유사측도를 이용한 고장 판단

Fig. 5에서 C_{m_s} 계수를 모니터링 함으로써 조종면 고장인지 아닌지를 판단하는 것이 용이해진다. 따라서, 두 소속함수로 고장유무를 명확히 구분할 있다. 우선, C_{m_s} 를 적용한 유사측도를 고려하면 다음과 같다.

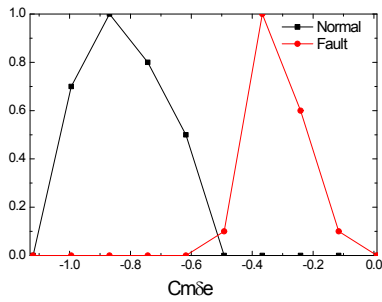
$$s_{m\delta c}(F_N, F_F) = 2 - d((F_N \cap F_F), [1]_X) - d((F_N \cup F_F), [0]_X)$$

여기서, F_N 와 F_F 는 각각 정상과 고장에 대한

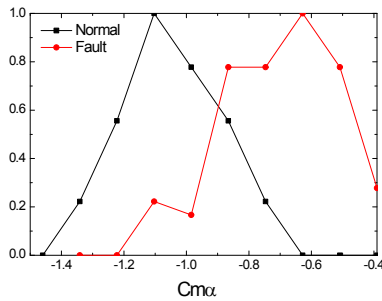
소속함수이다. C_{m_a} 와 C_{L_a} 계수는 정상과 고장이 혼합되어 있어 이 두 계수를 이용하여 고장유무를 판별하기가 힘들어진다. 이런 점에서 C_{m_s} , C_{m_a} , C_{L_a} 계수를 이용한 유사측도 방법이 된다. 다음으로 C_{m_a} 와 C_{L_a} 계수를 적용한 다른 유사측도가 제안될 수 있다.

$$s_{m\alpha}(F_N, F_F) = 2 - d((F_N \cap F_F), [1]_X) - d((F_N \cup F_F), [0]_X)$$

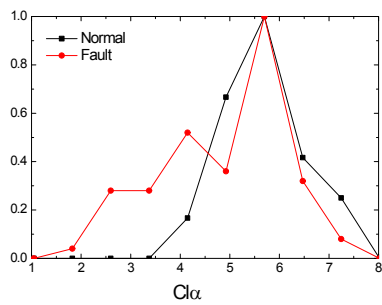
$$s_{L\alpha}(F_N, F_F) = 2 - d((F_N \cap F_F), [1]_X) - d((F_N \cup F_F), [0]_X)$$



(a) C_{m_s}



(b) C_{m_a}



(c) C_{L_a}

Fig. 5. C_{m_s} , C_{m_a} , C_{L_a} 계수의 멤버십 함수

Table 2. 퍼지 멤버십 함수를 갱신하기 위한 새로운 자료

	a (fault)	b (fault)	c (normal)	d (normal)
C_{m_s}	-0.3287	-0.3727	-0.7007	-0.7275
C_{m_a}	-0.7952	-1.0297	-1.2311	-1.0513
C_{L_a}	6.1320	5.6415	6.9730	5.4360

Table 3. 유사측도 계산

	a (fault)	b (fault)	c (normal)	d (normal)
$s_{m\delta e}(F_N, p)$	0	0	0.8000	0.8000
$s_{m\delta e}(p, F_F)$	1	1	0	0
$s_{m\alpha}(F_N, p)$	0.2222	0.7778	0.5556	1
$s_{m\alpha}(p, F_F)$	1	0.7778	0.2222	0.1667
$s_{L\alpha}(F_N, p)$	0.4167	1	0.2500	1
$s_{L\alpha}(p, F_F)$	0.3200	1	0.0800	1
$s(F_N, p)$	0.6389	1.7778	1.6056	2.8000
$s(p, F_F)$	2.3200	2.7778	0.3022	1.0000

소속함수를 갱신하기 위해 고장과 정상 상태인 새로운 분석자료 4개를 Table 2와 같이 나타내었다.

4개의 자료는 정상과 고장조건 공존하는 곳에 위치하고 있다. 유사측도를 계산하기 위해 대응되는 소속값이 필요하다. 이러한 유사측도는 다음과 같은 조합이 가능하다.

$$s(F_N, F_F) = \omega_1 s_{m\delta e}(F_N, F_F) + \omega_2 s_{m\alpha}(F_N, F_F) + \omega_3 s_{L\alpha}(F_N, F_F) \quad (8)$$

여기서, $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ 는 유사측도에 대한 가중치이다. 위의 식으로부터 4점에 대한 정상과 고장에 대한 경향이 계산된다. $s_{m\delta e}(F_N, F_F)$ 는 고장 포인트 p 에 대한 $s_{m\delta e}(F_N, p)$ 와 $s_{m\delta e}(p, F_F)$ 의 정상과 고장조건을 분류하는 것이다. $s_{m\alpha}(F_N, F_F)$ 와 $s_{L\alpha}(F_N, F_F)$ 에 대해서도 동일하게 4점을 분류할 수 있다.

Table 3에는 고장인 경우 a와 b의 유사측도가 정상치 보다 큼을 알 수 있다. 이는 유사측도에 의해 고장을 검출할 수 있음을 나타낸다. 또한 c와 d는 정상으로 검출된다. C_{L_a} 계수의 a, b, c, d는 명확한 C_{m_s} 의 소속함수에 의해 구분될 수 있다. 그림 5의 C_{m_a} 와 C_{L_a} 의 모든 소속함수가 겹쳐있다면, 가중치를 활용할 수 있다.

Fig. 3에 나타낸 고장진단 절차와 같이 비행 중

주기적으로 조종면의 트림값을 모니터링하며, 트림값이 일정오차 범위를 벗어나면, 가고장(Pseudo-Fault)으로 판별하고 실제의 고장인지 아닌지를 검증하는 절차를 거친다. 이 때 실시간 미계수 추정기법을 활용하여 표준 Database에 있는 여러 미계수와 비교하여 고장유무를 판별하고 트림값을 참조하여 그 위치를 검출해낸다.

참고문헌 [3]과 같이 공력계수 시뮬레이션 방법을 통한 고장진단의 경우, 주요 공력계수의 미소한 차이도 감지가 가능하다. 해석적인 방법에서 조종면 고정이나 손실이 있다면 그 차이가 명확하게 구분이 되지만, 실제 비행시험자료의 분석결과를 Fig. 4에 나타난 것과 같이 일정범위 내에서 산포하게 된다. 이렇게 산포하게 되며, 정상상태와 고장상태 자료가 서로 근접하거나 겹치게 된다. 특히, 20~30% 정도 조종면이 손실되는 비행 중 전투손상을 입게 된다면, Fig. 5(a)의 C_{m_s} 계수인 경우, 이 두 자료가 C_{m_s} 계수처럼 겹쳐지게 된다. 이러한 경우 고장판별은 더욱 더 힘들어지게 된다. 이때 고장유무를 판별하는 기준을 제공하는 것이 유사측도 방법이며, 2개 이상의 계수로 판별하므로 고장판별의 오류를 줄일 수 있다.

6. 결 론

승강타 효율계수 C_{m_s} 와 받음각에 따른 모멘트 계수 C_{m_s} 의 모니터링으로 고장유무 판별이 가능하다. 기준값과 트림값의 비교로 고장위치를 찾을 수 있다. 20~30%의 조종면 손실이 있을 경우 이론적으로 조종면 효율계수가 정상상태와 비교하여 비슷한 비율로 감소하게 되므로, C_{m_s} 의 산포도는 정상과 고장이 매우 근접하여 고장 검출이 난해해진다. 이 때, 유사측도를 적용하는 것이 매우 유용한 방법이 된다. 고장 검출에 계수 1개만을 사용하는 것이 아니라 다른 2가지 계수를 참조하므로 계수 하나에서 포함될 수 있는 오류를 최소화하는 이점이 있다. 또한, 유사측도 소속함수의 가장 오래된 자료는 제거되고 최신 자료는 추가되는 FIFO 개념이 적용된 하드웨어를 구현하였다.

후 기

이 논문은 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 중점연구소 지원사업으로 수행된 연구임(2011-0018394).

참고문헌

- [1] 김유단, “고장진단 및 다중화 기술개발”, 산업자원부, SUDP-P1-G4, 2005. 3.
- [2] Napolitano, M. R., Song, Y. K., Seanor, B., “Online Parameter Estimation for Restructurable Flight Control Systems,” Aircraft Design, Vol. 4, p. 19-50, 2001.
- [3] W.J. Park, E.T. Kim, Y.K. Song, and B.J. Ko, “A Study on the Real-Time Parameter Estimation of DURUMI-II for Control Surface Fault using Flight Test Data,” International Journal of Control, Automation, and Systems, Vol. 5, No. 4, 2007, p. 410-418.
- [4] W.J. Park, E.T. Kim, K.J. Seong, and Y.C. Kim, “A Study on the Parameter Estimation of DURUMI-II for the Fixed Right Elevator Using Flight Test Data,” Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 20., No. 8, 2006, pp. 1224-1231.
- [5] M.S. Hwang, W.J. Park, et al., “Lateral Stability Improvement of a Canard Airplane Using a Vertical Panel,” AIAA Atmospheric Flight Mechanics Conference and Exhibit, AIAA-2002-4625, Monterey, California, 2002.
- [6] Morelli, E. A., “Real-Time Parameter Estimation in the Frequency Domain,” Proceedings of the 1999 AIAA Atmospheric Flight Mechanics Conference, AIAA-99-4043, Portland, Or., 1999.
- [7] W.J. Park, “A Study on the Design of Real-Time Parameter Estimator for an Aircraft,” PhD Thesis, Hankuk Aviation University. 2004.
- [8] W.J. Park, S.H. Lee, and J.I. Song, “Fault detection and isolation of DURUMI-II using Similarity Measure,” Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 23. No. 2, 2009, pp. 302-310.
- [9] X. Liu, “Entropy, distance measure and similarity measure of fuzzy sets and their relations,” Fuzzy Sets and Systems, Vol. 52, pp. 305-318, 1992.
- [10] J. L. Fan, W. X. Xie, “Distance measure and induced fuzzy entropy,” Fuzzy Set and Systems, Vol. 104, pp. 305-314, 1999.
- [11] J. L. Fan, Y. L. Ma, and W. X. Xie, “On some properties of distance measures,” Fuzzy Set and Systems, Vol. 117, pp. 355-361, 2001.
- [12] S.H. Lee, S.P. Cheon, and J.H. Kim, “Measure of certainty with fuzzy entropy function”, LNA

- I, Vol. 4114, pp. 134-139, 2006.
- [13] S.H. Lee, Y.T. Kim, S.P. Cheon, and S.S. Kim, "Reliable Data Selection with Fuzzy Entropy", LNAI, Vol. 3613, pp. 203-212, 2005.
- [14] S.H. Lee, J.M. Kim, and Y.K. Choi, "Similarity measure construction using fuzzy entropy and distance measure", LNAI Vol.4114, pp. 952-958, 2006.
- [15] S.M. Chen, "New methods for subjective mental workload assessment and fuzzy risk analysis", *Cybern. Syst. : Int. J.*, Vol. 27, No. 5, pp. 449-472, 1996.
- [16] C.H. Hsieh and S.H. Chen, "Similarity of generalized fuzzy numbers with graded mean integration representation," in Proc. 8th Int. Fuzzy Systems Association World Congr., Vol 2, pp. 551-555, 1999.
- [17] H.S. Lee, "An optimal aggregation method for fuzzy opinions of group decision," Proc. 1999 IEEE Int. Conf. Systems, Man, Cybernetics, Vol. 3, pp. 314-319, 1999.
- [18] S.J. Chen and S.M. Chen, "Fuzzy risk analysis based on similarity measures of generalized fuzzy numbers," *IEEE Trans. on Fuzzy Systems*, Vol. 11, No. 1, pp. 45-56, 2003.
- [19] P. Subasic and K. Hirota, "Similarity rules and gradual rules for analogical and interpolative reasoning with imprecise data," *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 96, No. 1, pp. 53-75, 1998.
- [20] S.H. Lee, "Comparison Study for Similarities based on Distance Measure and Fuzzy Number", *Journal of Fuzzy Logic and Intelligent Systems*, Vol.17, No. 1, pp. 1-6, 2007.
- [21] Fan, J. L., and W. X. Xie, "Distance measure and induced fuzzy entropy, *Fuzzy Set and Systems*," 104, 305-314, 1999.
- [22] S. H. Lee, H. J. Park, and W. J. Park, "Similarity computation between fuzzy set and crisp set with similarity measure based on distance," to be appeared in LNCS, 2008.