# (19)대한민국특허청(KR)(12) 등록특허공보(B1)

(51) 。Int. Cl. G01P 15/02 (2000	5.01)	(45) 공고일자 (11) 등록번호 (24) 등록일자	2006년05월23일 10-0582584 2006년05월16일
(21) 출원번호 (22) 출원일자 	10-2004-0083741 2004년10월19일	(65) 공개번호 (43) 공개일자	10-2006-0034573 2006년04월24일
(73) 특허권자	재단법인서울대학교산학협력재단 서울특별시 관악구 봉천동 산 4-2		
(72) 발명자	김승균 서울 영등포구 신길4동 삼성아파트 104-1203		
	김유단 서울 서초구 방배3동 임광아파트 2-1105		
(74) 대리인	장한특허법인		

심사관 : 강성철

# (54) 관성측정센서의 비모델 복합고장진단기법

# 요약

개시된 관성측정센서의 비모델 복합고장진단기법은 복수의 관성측정센서에 대한 측정신호를 하드웨어 여분에 기반한 패 러티식(parity equation)으로 계산하여 관성측정센서의 고장을 진단하는 단계와, 상기 관성측정센서의 각각의 신호를 가 지고 이산 웨이블렛 변환(discrete wavelet transform)을 수행하고 그 변환값에 대해 직렬감시(in-line monitoring)를 수 행하여, 어떤 관성측정센서에 고장이 발생하는지 고장 분리하는 단계를 포함한다.

상기한 본 발명에 의하면, 항공기의 수학적 모델을 사용하지 않기 때문에, 무인항공기 시스템과 같은 저가형의 항공기의 복합 고장진단 및 분리에 쉽게 적용할 수 있다.

## 대표도

도 5

색인어

고장진단 및 분리, 관성측정센서, 이산 웨이블렛 변환, 여분 관리.

# 명세서

도면의 간단한 설명

도 1은 고장진단 및 분리방법의 분류를 나타낸 도면,

도 2는 다중해상도 분해의 처리단계를 나타낸 도면,

도 3은 다중해상도 분해의 전체 단계를 나타낸 도면,

도 4는 Db4 웨이블렛을 나타낸 도면,

도 5는 본 발명의 실시예에 따른 복합고장 진단기법의 블록선도,

도 6은 수치 시뮬레이션을 위한 4개의 비대칭 중첩센서의 기하학적 배치도,

도 7은 큰 바이어스 고장인 경우, 수치 시뮬레이션에 의한 패러티식의 시간 궤적을 나타낸 그래프, 도 8은 큰 바이어스 고장인 경우, 수치 시뮬레이션에 의한 이산 웨이블렛 변환값을 나타낸 그래프, 도 9는 작은 바이어스 고장인 경우, 수치 시뮬레이션에 의한 패러티식의 시간 궤적을 나타낸 그래프, 도 10은 작은 바이어스 고장인 경우, 수치 시뮬레이션에 의한 이산 웨이블렛 변환값을 나타낸 그래프, 도 11은 작은 드리프트 고장인 경우, 수치 시뮬레이션에 의한 패러티식의 시간 궤적을 나타낸 그래프, 도 12는 작은 드리프트 고장인 경우, 수치 시뮬레이션에 의한 이산 웨이블렛 변환값을 나타낸 그래프, 도 13은 작은 스파이크 고장인 경우, 수치 시뮬레이션에 의한 패러티식의 시간 궤적을 나타낸 그래프, 도 14는 작은 스파이크 고장인 경우, 수치 시뮬레이션에 의한 패러티식의 시간 궤적을 나타낸 그래프,

도 16은 급격한 기동인 경우, 수치 시뮬레이션에 의한 이산 웨이블렛 변환값을 나타낸 그래프이다.

<도면의 주요부분에 대한 부호의 설명>

100 : 슈퍼바이저 프로세서 110 : 실시간 서브프로세서

120: 비대칭 센서 130: 요구성 서브프로세서

132 : 스택 버퍼

발명의 상세한 설명

발명의 목적

## 발명이 속하는 기술 및 그 분야의 종래기술

본 발명은 관성측정센서의 비모델 복합고장진단기법에 관한 것으로서, 더 상세하게는 항공기의 내·외부적 요인에 의하여 항공기에 탑재된 센서나 구동기에 고장이 발생한 경우, 고장의 발생 여부를 신속하게 판단하고 고장이 발생한 부품을 찾아 내는 복합 고장진단 및 분리기법(Hybrid Fault Detection and Isolation)에 관한 것이다.

관성측정센서(Inertial Measurement Sensor)는 보통 항공기나 자동차 등의 동역학 시스템의 자세나 가속도를 측정하는 센서를 말한다.

동역학 시스템에서 여분관리(redundancy management) 시스템의 핵심요소로서 다양한 고장진단 및 분리기법들이 1960 년 이후로 연구 중이다.

도 1에 도시한 바와 같이 일반적으로 고장진단 및 분리기법은 여분의 종류에 따라 하드웨어(hardware) 여분기법과 해석 적(analytic) 여분기법으로 분류된다.

하드웨어 여분기법은 신호의 일치성을 분석하기 위하여 동일한 기능의 센서를 중첩하는 중첩센서(multiple sensor)를 사 용한다.

이러한 하드웨어 여분은 전체 시스템을 복잡하게 만들고 경제적으로 비효율적이다.

해석적 여분기법은 시스템의 수학적 모델을 이용하고, 최근에 관측기, 패러티 공간(parity space) 및 강건 매개변수 (robust approach) 추정을 이용한 기법들이 제안된다.

해석적 여분기법에서는 모델링의 불확성으로 인하여 센서의 고장을 제대로 진단하지 못하는 경우가 발생한다.

고장진단 및 분리기법은 또한 대상 시스템의 수준에 따라 도 1과 같이, 시스템 수준의 고장진단기법과, 하위시스템 수준의 고장진단기법으로 분류된다.

시스템 수준의 고장진단기법은 서로 다른 센서들의 출력에 기반하는 경우 안전성과 강건성을 보장하지 못한다.

이는 같은 종류의 센서라 할지라도 온도, 압력, 탑재위치 등과 같은 환경조건에 따라서 고유한 특성을 나타내기 때문이다.

실제적으로는 하위 시스템 수준의 기법, 즉 센서신호에 기반한 직렬감시기법(In-Line Monitoring ; ILM)이 고장진단에 많 이 사용된다.

하위 시스템 수준의 고장진단기법들은 외부의 도움이 없이 가공되지 않은 센서의 출력을 직접 이용한다는 장점이 있으나, 예를 들어 무인항공기가 갑작스런 기동을 수행할 경우 거짓 고장경보(false alarm)를 발생시키는 등의 문제점이 있다.

#### 발명이 이루고자 하는 기술적 과제

상술한 문제점을 해결하기 위하여 안출된 본 발명은, 하드웨어 여분을 이용하는 패리터식 기법과 이산 웨이블렛 변환에 기 반한 ILM 기법을 복합적으로 사용하여 항공기의 수학적 모델을 사용하지 않기 때문에, 무인항공기 시스템과 같은 저가형 의 항공기의 복합 고장진단 및 분리에 쉽게 적용할 수 있는 관성측정센서의 비모델 복합고장진단기법을 제공하는데 그 목 적이 있다.

본 발명의 다른 목적은 최소한의 여분 센서를 가지는 무인항공기 시스템의 다양한 고장 유형에 대하여 효과적인 고장진단 을 수행할 수 있는 관성측정센서의 비모델 복합고장진단기법을 제공하는데 있다.

## 발명의 구성 및 작용

상술한 목적을 달성하기 위한 본 발명의 실시예에 따른 관성측정센서의 비모델 복합고장진단기법은, 복수의 관성측정센서 에 대한 측정신호를 하드웨어 여분에 기반한 패러티식(parity equation)으로 계산하여 관성측정센서의 고장을 진단하는 단계와, 상기 관성측정센서의 각각의 신호를 가지고 이산 웨이블렛 변환(discrete wavelet transform)을 수행하고 그 변 환값에 대해 직렬감시(in-line monitoring)를 수행하여, 어떤 관성측정센서에 고장이 발생하는지 고장 분리하는 단계를 포 함한다.

여기서 상기 패러티식에 의한 고장진단이 이산 웨이블렛 변환 기반의 직렬감시에 의한 고장분리보다 우선함이 바람직하다.

또한, 상기 패러티식은 실시간으로 계산하고, 이산 웨이블렛 변환은 패러티식에 의해 고장이 검출된 상황에서만 계산함이 바람직하다. 이하 본 발명의 실시예에 대하여 첨부된 도면을 참고로 그 구성 및 작용을 설명하기로 한다.

이하에서 본 발명은 I) 패러티식 기법(Parity Equation Approach : PEA), II) 이산 웨이블렛 변환(Discrete Wavelet Transform : DWM)의 기본 개념, III) 다중 해상도 분해기법, IV) DWT에 기반한 ILM 및 고장 진단, V) 본 발명의 실시예에 따른 복합 고장진단기법에 대해 설명하고, 마지막으로 VI) 그 복합 고장진단기법의 효과를 알아내기 위한 수치 시뮬레 이션에 대해 설명하고자 한다.

I. 패러티식 기법

고장진단에 사용되는 하드웨어 여분에 기반한 패러티식은 센서에 대한 입력신호에 대하여 독립적이어야 하므로, 일반적으 로 측정 행렬의 영공간(null space) 혹은 잔차(residual)를 통해 구성된다.

본 발명에서는 패러티식의 구성을 위하여 기하학적 배치구조를 이용한다.

고장신호와 측정잡음을 포함한 관성측정센서의 측정행렬은 수학식 1과 같다.

#### 수학식 1

#### m(t) = Hx(t) + e + f

여기서, m(t), x(t), e, f와 H는 각각 n 개의 관성측정센서에 대한 측정신호, 동체축에 대한 센서 입력신호, 잡음 신 호, 고장신호 벡터, 그리고 동체축과 센서축 사이의 측정(Direction Cosine Matrix)을 의미한다.

만약 3개 혹은 그 이상의 센서가 같은 평면에 존재하지 않는다면 즉, 서로 독립적인 기하학적 배치구조를 이루고 있다면, 4 개의 센서를 선형조합하여 "<sup>C</sup>4개의 패러티식을 구성하고, 수학식 1에서 <sup>H</sup>의 4개 열로 이루어진 부분행렬의 영공간 벡 터가 하나의 패러티식 계수를 구성한다.

이때 어떤 센서에서 고장이 발생하면 그 센서에 관련된 패러티식이 영이 아닌 값을 가지게 된다.

센서 수가 증가할수록 패러티식의 수도 역시 증가하게 되며 4개의 여분센서가 비대칭 구조로 배치될 경우 단지 1개의 패 러티식만을 사용할 수 있다.

하나의 패러티식은 고장진단은 수행할 수 있으나 고장 분리를 할 수 없다.

상기한 하드웨어 여분에 기반한 패러티식 기법을 사용하는 경우 제한된 중첩센서 시스템이라 할지라도 고장검출은 쉽게 이루어질 수 있다.

그러나 패러티식의 수가 부족하기 때문에 고장 분리는 불가능하다.

Ⅱ. DWT의 기본 개념

웨이블렛 변환은 지진파의 분석을 연구하던 진 모렛(Jean Morlet)에 의해 1983에 처음 제안된 것으로, 그 후 영상 처리와 신호분석 분야에서 발전되어 왔다.

푸리에(Fourier) 변환은 정상상태(stationary) 신호를 분석하는데 널리 사용되고 있지만, 비정상상태(non-stationary) 신 호분석에는 유용하지 못하다.

고장신호는 일반적으로 비정상상태 신호를 분석하는데 유용하게 사용될 수 있으므로, 고장진단에 적합한 신호처리 도구이 다.

아래의 수학식 2는 윈도우(Windowed) 푸리에 변환식이다.

수학식 2
$$(T^{\textit{win}}f)(w,t) = \int f(s)g^{\textit{w,t}}(s)ds$$

여기서  $g^{w,t}(s)=g(s-t)e^{-jws}$ 

웨이블렛 변환은 시간과 주파수의 국소정보를 제공한다는 점에서 상기 원도우드 푸리에 변환과는 유사하게 보일 수 있으 나 중요한 차이점을 가진다.

다음 수학식 3으로 나타낸 연속 웨이블렛 변환(Continuous Wavelet Transform : CWT)은 상기 수학식 2와 유사한 형태 를 가진다.

수학식 3
$$(T^{CWT}f)(a,b) = \int f(t)\psi^{a,b}(t)dt$$

여기서 연속 모(mother)웨이블렛(\(\V''''''')))은 수학식 4와 같이 표현된다.

수학식 4
$$\psi^{a,b}(t) = |a|^{-1/2}\psi(\frac{t-b}{a})$$

여기서 *a*와 *b*는 a≠0라는 조건하에서 실수집합의 범위에서 연속으로 변화할 수 있다.

모웨이블렛(mother wavelet)이라 불리는 함수  $\Psi(x)$ 는 다음과 같은 수학식 5를 만족해야 한다.

수학식 5
$$\int_{\mathcal{R}} \psi(x) dx = 0$$

웨이블렛과 윈도우 푸리에 변환의 가장 큰 차이점은 사용되는 분석함수의 모양이다.

즉, 윈도우 푸리에 변환의 수학식 2에서 주파수와 무관하게 모든 **8<sup><sup>₩,t</sup>(s)</sup>는 같은 너비를 가지지만, 반대로 웨이블렛 변환** 의 수학식 3에서 Ψ<sup>*a,b*</sup>(**t**)<sub>는</sub> 주파수에 적합한 시간 영역 너비를 가진다.

따라서 상기 수학식 4의 <sup>44</sup>가 변할수록 다른 주파수 영역의 정보가 고려되고, <sup>56</sup>가 변할수록 시간 영역의 중심이 이동된 다.

결과적으로 웨이블렛 변환이 짧은 시간동안 지속되는 고주파수 현상을 집중적으로 관찰할 수 있으며, 아주 느린 진동에 대 하여 넓은 관찰범위를 가질 수 있다는 점에서 윈도우 푸리에 변환보다 더 나은 성능을 발휘한다.

유사하게  $a=a_0^m$ ,  $b=nb_0a_0^m$ 로 선택하여 모웨이블렛이 이산 형태(discrete form)로 변환된다.

이때  $a_{o\mathfrak{P}} b_{0} b_{0} a_{0} > 1, b_{0} > 0$ , m,n∈Z라는 제한조건을 만족한다.

DWT는 다음의 수학식 6으로 정의된다.

수학식 6
$$(T^{\mathcal{DWT}}\!f)(m,n) = \int\!f(t)\psi^{m,n}(t)dt$$

여기서 이산 모웨이블렛은 수학식 7로 표현된다.

수학식 7
$$\psi^{m,n}(t) = a_0^{-m/2} \psi(\frac{t - nb_0 a_0^m}{a_0^m})$$

가장 간단한 형태로서  $a_0=2$ 와  $b_0=1$ 로 설정하면, 2의 누승(dyadic) 형태의 정규직교 웨이블렛 변환(orthonormal wavelet transform)이 구성된다.

직교성은 신호를 서로 다른 시간과 주파수 분해능을 가질 수 있도록 분리시키는 역할을 하는 다중해상도 분해(Multiresolution Signal Decomposition : MSD)를 가능하게 한다.

그리고 직교성(orthogonality)으로 인하여 다중해상도로 분해된 각 신호간에 중첩정보가 없는 독립성을 보장받게 된다.

Ⅲ. 다중 해상도 분해기법

길이 N의 신호 s를 가정할 경우, DWT는  $\log_2 N$  연산단계를 요구하는 반면, 고속(fast) 푸리에 변환은  $N\log_2 N$  연산

이것은 DWT가 고속 푸리에 변환보다도 훨씬 빠른 계산속도와 작은 계산부하를 가지는 것을 의미한다.

그러므로 DWT는 ILM에 기반한 실시간 고장진단에 적절한 신호처리 기법이다.

도 2에 도시된 바와 같이, 다중 해상도 분해기법은 센서의 직접적인 출력  $^{S}$ 로부터 시작하여 첫 번째 단계에서 두 가지 웨 이블렛 계수신호인 근사계수(approximation coefficient)  $c_1(n)$ 과 상세계수(detail coefficient)  $d_1(n)$ 을 생성한다.

이 계수 벡터들은 각각 센서신호 s와 저주파필터 h(n), 고주파필터 g(n)을 통과하여 얻어진다.

상기한 바와 같이 다중 해상도 분해기법을 사용하면 센서신호가 근사신호(approximated or smoothed version)와 상세 신호(detailed version)로 분해된다.

그 중에서 상세신호는 잡음과 바이어스(bias), 드리프트(drift), 스파이크(spike) 등과 같은 고장성분을 포함한다.

여기서는 다중 해상도 분해기법에 대해 간략하게 설명한다.

우선 계수  $c_0^n$ 을 일정 시간 동안의 이산화된 센서신호라 가정하고, 센서신호는 스케일 1에서 근사신호  $c_1(n)$ 과 상세신  $c_1(n)$ 으로 분해된다.

이를 다음 수학식 8과 9로 식으로 나타낼 수 있다.

수학식 8
$$c_1(n) = \sum_k h(k-2n)c_o(k)$$

수학식 9
$$d_1(n) = \sum_k g(k-2n)c_o(k)$$

여기서  $h(n)_{\text{과}} g(n)_{\text{은}}$  각각 관련 필터 계수이다.

도 3에 도시한 바와 같이, 다음 단계의 분해과정은 전 스케일의 근사신호 <sup>C</sup>1<sup>(n)</sup>으로부터 시작된다. 스케일 1과 유사하게 다음과 같이 수학식 10과 11로 나타낼 수 있다.

수학식 10
$$c_2(n) = \sum_k h(k-2n)c_1(k)$$

수학식 11

$$d_2(n\,)=\sum_k g(k-2n\,)c_1(k)$$

더 높은 스케일의 분해과정은 상기한 과정을 반복하는 것과 같이 진행된다.

Ⅳ. DWT에 기반한 ILM 및 고장진단.

상기한 다중 해상도 분해기법은 실제 센서신호에서 잡음신호를 찾아내어 구별하는 역할을 수행한다.

그러므로 DWT를 이용한 다중해상도 분해기법은 센서의 고장진단에 적용된다.

필터 h(n)과 g(n)은 다음 수학식 12와 13과 같이 스케일링 함수  $\phi(t)$ 와 웨이블렛 함수  $\psi(t)$ 를 결정한다.

수학식 12  

$$\phi(t) = \sqrt{2} \sum_{n} h(n) \phi(2t-n)$$

### 수학식 13

$$\psi(t) = \sqrt{2}\sum_n g(n)\phi(2t\!-\!n)$$

웨이블렛 함수의 적절한 선택은 다양한 종류의 고장을 탐지하는데 중요한 역할을 한다.

짧은 시간 동안에 일어나는 급격한 천이형의 고장진단이 목적이라면, 도 4에 도시된 Daubechies' 4(Db4) 웨이블렛을 적 절한 웨이블렛 함수로 사용함이 바람직하다.

반면에 드리프트와 같이 느린 고장의 형태의 경우에는 Db8이나 Db10이 비교적 적절하다.

본 발명에서는 Db4 웨이블렛 함수를 선정하고, 느린 형태의 고장을 진단하기 위하여 다중 해상도 분해기법의 상위 스케일 신호를 사용한다. 그 이유는 상위 스케일로 갈수록 웨이블렛의 팽창성(dilation)으로 인하여, 웨이블렛의 국지 분석성이 떨어지기 때문이다. 도 4는 Db4 웨이블렛의 스케일링 함수, 웨이블렛 함수 그리고 분해 필터를 보여준다.

센서잡음 n(t)가 분산  $\sigma^2$ 을 가지는 가우시안(Gaussian) 분포라고 가정하면, n(t)의 DWT  $T^{DWT}n(t)$  역시 분산  $E[||T^{DWT}n(t)||^2]$ 을 가지는 가우시안 프로세스라고 할 수 있다.

여기서  $E[X]_{는 확률변수} X_{의 기대값을,} || ||^{2} L^{2}(R)_{M H \operatorname{QU} 2-k(norm)}$ 을 나타낸다.

만약 센서가 비교적 정확한 잡음 특성을 가지고 있다면, 고장 경보의 한계값은 수학식 14와 같이 표준편차의 약 세 배로 정 한다.

#### 수학식 14

$$Th_{fault} = 3E \left[ \parallel T^{DWT}n(t) \parallel^2 \right]$$

이상의 DWT를 사용하는 ILM은 각 센서의 고장, 즉 센서신호의 변이점을 진단한다.

그럼에도 불구하고 웨이블렛 변환에 기반한 고장진단기법은 몇 가지 약점을 가진다.

우선 항공기는 고수준의 동역학 시스템이며 다양한 급격한 기동을 수행하는 경우가 발생된다.

항공기가 급격히 기동을 하는 경우 센서출력의 웨이블렛 변환값은 증가할 것이며, 그러한 급격한 변이는 거짓고장 경보를 발생하는 원인이 된다.

또한, DWT는 빠른 계산속도를 가지지만 일정 시간 동안의 저장된 센서 데이터를 필요로 한다.

그러므로 항공기의 센서신호를 실시간으로 처리하는데 어려움을 가지고 있다.

Ⅴ. 복합 고장진단 기법

이와 같이 하드웨어적 여분에 기반한 고장진단기법과 DWT에 기반한 ILM은 각각 고유한 약점을 가지고 있기 때문에, 이 두 기법을 통합하므로 효과적으로 고장을 진단하고 분리할 수 있다.

공간과 비용을 고려하여 하드웨어적 여분의 수를 제한해야 할 경우에, 패러티식의 부족함은 DWT에 기반한 ILM으로 보완 할 수 있다.

한편, 항공기의 기동 때문에 거짓고장 경보를 발생하는 DWT의 문제점은 패러티식 기법에 의하여 방지될 수 있다.

이는 패러티식 기법이 센서의 기하학적 배치구조를 이용하기 때문에 어떠한 기동에도 무관하게 고장을 검출할 수 있기 때 문이다.

상술한 바와 같이, 패러티식 기법과 DWT를 혼용하는 개념이 고장진단 및 분리에 효과적이다.

그러나 모델정보에 자유로운 복합고장진단기법을 구현하는 단계에서 유의해야 할 점이 있다.

첫 번째 고려사항은 고장진단과 경보발생에 있어서의 우선권이다.

DWT는 급격한 기동에 대하여 거짓고장을 발생시키는 반면에, 패러티식 기법은 센서간의 기하학적 관계를 이용하므로 신 호의 상태에 무관하게 고장의 유무를 판단한다. 그러므로 패러티식 기법이 고장의 유무를 판단하는 고장진단의 단계에서 우선권을 가져야 한다.

두 번째 고려사항은 웨이블렛 변환의 계산 부하이다.

패러티식 기법은 상대적으로 매우 가벼운 계산능력을 요구하지만, 웨이블렛 변환은 저장된 일정시간의 센서데이터에 대하 여 상승(convolution) 연산과정을 사용하므로 높은 계산 부하를 가진다.

또한, DWT를 고장이 나지 않은 정상상태에서 수행하는 것은 프로세서의 부하에 유익하지 않다.

결론적으로 패러티식 기법은 실시간으로 계산되어야 하고, 웨이블렛 변환은 고장경보가 발생되는 상황에서만 계산되는 요 구성 작업의 성격을 가져야 한다.

도 5는 본 발명의 실시예에 따른 복합고장진단기법의 블록선도이다.

실시간 서브프로세서(sub-processor)(110)는 비대칭 배치 센서들(120)의 패러티식을 실시간으로 계산한다.

슈퍼바이저(supervisor) 프로세서(100)는 패러티식의 한계값 초과를 감시하고, 그 동안에 요구성(on-demand) 서브프로 세서(130)의 스택 버퍼(132)는 비행 중에 일정시간 동안의 센서 데이터를 저장한다.

일단 고장상황이 발생하면 패러티식은 한계값을 초과하게 되고, 동시에 슈퍼바이저 프로세서(100)는 긴급 고장상황(Fault Detection)을 선언하고, 각각의 요구성 서브프로세서(130)에 고장경보를 보낸다.

정해진 짧은 시간 내에 각 요구성 서브프로세서는 스택 버퍼(132)에 저장된 센서데이터를 가지고 DWT를 수행하고, 슈퍼 바이저 프로세서(100)는 어떤 센서에 고장이 발생하였는지(Fault Isolation)를 판단하게 된다.

중요한 설계변수는 요구성 서브프로세서(130)의 스택 사이즈, DWT에 필요한 센서 데이터의 길이이다.

스택 사이즈가 작을수록 DWT는 빠르게 계산되고, 계산시간은 탑재 프로세서의 성능에도 좌우될 수 있다.

그러므로 DWT에 사용되는 센서 데이터의 길이는 하드웨어 계산 능력과 항공기 제어시스템의 안정성 여유를 고려하여 결 정되어야 한다.

Ⅵ. 수치 시뮬레이션

도 6은 본 발명에서 수치 시뮬레이션에 사용된 네 개의 비대칭 센서들의 기하학적 관계를 보여준다.

세 개의 센서는 직교축에 평행하고, 나머지 한 개의 센서는 경사 배치된다.

이러한 배치는 고장의 유무만을 판단할 수 있는 최소한의 센서 배치이고, 세개 이상의 센서가 한 평면 위에 존재하지 않으 므로, 단지 한 개의 패러티식만을 얻을 수 있다.

비대칭 구조로 배치된 이와 같은 4개의 여분센서를 갖는 시스템은 최소한의 중첩된 센서를 사용하는 시스템으로 무인항공 기와 같은 저가이며 탑재공간이 작은 소형시스템에 적합한 시스템이다.

어떤 센서에 고장이 발생하면 그 센서에 관련된 패러티식이 영(0)이 아닌 값을 가지게 된다.

이때 고장난 센서는 거짓 경보 확률에 의해 결정되는 한계값(threshold)과 모든 센서들의 패러티식의 값을 비교하여 분리 된다.

첫 번째 시뮬레이션 조건으로, 항공기의 각속도가 섭동과 진동을 하고 있다고 가정하고, 그 상태에서 53초에 센서 3에 큰 바이어스 고장(large sudden bias)이 발생하는 경우, 도 7은 패러티식이 53초에 고장을 검출하지만 분리시킬 수 없음을 보여준다. 이 경우에 도 8은 각 센서의 DWT가 고장센서 3을 분리시킬 수 있음을 보여준다.

센서 3의 첫 번째 스케일 상세신호(D1)는 53초에 고장으로 인해 발생하는 센서신호의 빠른 천이현상, 즉 불연속점을 잘 검 출하고 있음을 알 수 있다.

두 번째 시뮬레이션 조건으로, 첫 번째 경우와 같이 항공기의 각속도가 섭동과 진동을 하고 있다고 가정하고, 53초에 센서 3에 작은 바이어스 고장(small sudden bias)이 발생한 경우, 도 9는 패러티식이 고장을 검출하는 것을 보여준다.

도 10은 각 센서의 DWT가 고장센서 3을 분리시키는 것을 보여준다.

센서 3의 첫 번째 혹은 두 번째 스케일 상세신호(D1 이나 D2)는 53초에 고장으로 인해 발생하는 센서신호의 불연속점을 잘 검출하고 있음을 알 수 있다.

그러므로 모델정보를 사용하지 않으면서도 복합고장진단 기법이 바이어스 고장에 대하여 좋은 성능을 보이는 것을 알 수 있다.

세 번째 시뮬레이션은 53초에 센서 3에 작은 드리프트 고장(drifting bias)이 발생한 경우이다.

도 11은 패러티식이 고장을 검출하는 것을 보여준다.

도 12는 각 센서의 DWT가 고장센서 3을 분리시키는 것을 보여준다.

센서 3의 네 번째 스케일 상세신호(D4)는 53초에 고장으로 인해 발생하는 센서신호의 불연속점을 잘 검출하고 있음을 알 수 있다.

바이어스 고장의 경우와는 달리 D1이나 D2보다 다중해상도 분해의 고수준 스케일 신호 D4가 드리프트와 같은 느린 고장 에 대해서 보다 효과적이라는 것을 보여준다.

또한, 센서신호의 다중해상도 분해 각 스케일 신호를 비교하면 고장의 유형도 진단할 수 있음을 알 수 있다.

네 번째 시뮬레이션은 33초에 센서 2에, 53초에 센서 3에 아주 작은 스파이크 고장(spike fault)이 발생한 경우이다.

작은 스파이크 고장은 순간적인 센서신호의 이상현상으로서, 그 크기가 어느 이하일 경우에는 센서시스템에 심각한 영향 을 끼치지 않는다.

도 13에서 패러티식이 스파이크 고장을 검출하지만, 한계값을 초과하는 시간이 매우 짧게 지속되므로 고장을 선언하지 않는다.

도 14는 각 센서의 DWT가 작은 스파이크일지라도 고장을 선언하고 있음을 볼 수 있다.

센서 2와 3의 모든 스케일 상세신호(D1~D4)가 스파이크가 발생하는 센서신호의 불연속점을 검출하고 있다.

그러므로 패러티식 기법이 스파이크와 같은 순간적인 신호의 이상현상의 경우에 보다 믿을만한 정보를 주는 것을 알 수 있 다.

다섯 번째 시뮬레이션은 항공기가 급격한 기동(abrupt maneuver)을 하지만 어떠한 센서에도 고장이 나지 않은 경우이다.

도 15는 패러티식이 어떠한 고장 선언도 하지 않는다는 것을 보여준다.

물론 고장이 발생하지 않았기 때문에 패러티식의 판단은 정확하다.

그러나 도 16에서 각 센서의 DWT는 센서들이 건강한 상태임에도 불구하고 센서 1과 센서 4에서 고장을 선언한다.

이러한 사실은 패러티식 기법이 고장을 선언하고 경보를 발생하는 데 있어서, 이산 웨이블렛 변환에 대하여 우선권을 가져 야만 한다는 것을 보여준다.

결론적으로 첫 번째부터 세 번째까지의 시뮬레이션은 본 발명에 따른 복합고장진단 기법의 효율성을 보여주며, 네 번째와 다섯 번째 시뮬레이션은 패러티식 기법이 DWT의 약점을 보완하고 있다는 것을 보인다.

본 발명에서 상기 패러티식 기법 이외에도 패러티 공간기법(Parity Space Approach : PSA), 최소자승 유수기법(Least Square Residual Approach : LSRA), 그리고 유사확률기법(Generalized Likelihood Ratio Test : GLT)과 같은 다른 하 드웨어 여분 기반 고장진단기법들이 사용될 수도 있다.

물론, 윈도우 푸리에 변환, 자동회귀(auto-regressive) 모델, 그리고 파워 스펙트럼 분석과 같은 다른 신호처리기법들이 사용될 수도 있지만, DWT 기법이 고장진단에 있어서는 상대적인 장점을 가진다.

이상에서와 같이, 본 발명은 하드웨어 여분기반 기법과 신호처리에 기반을 둔 ILM의 약점을 보완함으로써 제한된 수의 중 첩센서를 가지고 있는 시스템에 대하여 다양한 고장유형을 효과적으로 검출하고 분리할 수 있다.

또한, 동일 시간에 발생하는 다중 고장(multiple fault)에 대해서도 검출이 가능하다.

또한, 두 기법 모두 시스템의 수학적 모델을 사용하지 않는다는 장점을 가지고 있으므로, 수학적 모델이 상대적으로 부정 확한 무인항공기 시스템에 적합한 고장진단 및 분리를 할 수 있다.

### 발명의 효과

이상에서 살펴본 바와 같이 본 발명에 따르면, 하드웨어 여분을 이용하는 패리터식 기법과 이산 웨이블렛 변환에 기반한 ILM 기법을 복합적으로 사용하여 항공기의 수학적 모델을 사용하지 않기 때문에 무인항공기 시스템과 같은 저가형의 항 공기의 복합 고장진단 및 분리에 쉽게 적용할 수 있다.

또한, 최소한의 여분 센서를 가지는 무인항공기 시스템의 다양한 고장 유형에 대하여 효과적인 고장진단을 수행할 수 있 다.

본 발명은 상기에 설명되고 도면에 예시된 것에 의해 한정되는 것은 아니며 다음에 기재되는 청구의 범위 내에서 더 많은 변형 및 변용예가 가능한 것임은 물론이다.

## (57) 청구의 범위

# 청구항 1.

복수의 관성측정센서에 대한 측정신호를 하드웨어 여분에 기반한 패러티식(parity equation)으로 계산하여 관성측정센서 의 고장을 진단하는 단계 ; 및

상기 관성측정센서의 각각의 신호를 가지고 이산 웨이블렛 변환(discrete wavelet transform)을 수행하고 그 변환값에 대 해 직렬감시(in-line monitoring)를 수행하여, 어떤 관성측정센서에 고장이 발생하는지 고장 분리하는 단계를 포함하는 관 성측정센서의 비모델 복합고장진단기법.

## 청구항 2.

제1항에 있어서,

상기 패러티식에 의한 고장진단이 이산 웨이블렛 변환 기반의 직렬감시에 의한 고장분리보다 우선함을 특징으로 하는 관 성측정센서의 비모델 복합고장진단기법.

# 청구항 3.

제1항에 있어서,

상기 패러티식을 실시간으로 계산함을 특징으로 하는 관성측정센서의 비모델 복합고장진단기법.

# 청구항 4.

제3항에 있어서,

상기 이산 웨이블렛 변환은 패러티식에 의해 고장이 검출된 상황에서만 계산함을 특징으로 하는 관성측정센서의 비모델 복합고장진단기법.

## 청구항 5.

제1항에 있어서,

상기 고장진단 단계에서, 복수의 관성측정센서 중 3개 이상의 센서가 같은 평면에 존재하지 않은 경우, 고장신호와 측정잡 음을 포함한 관성측정센서의 측정행렬을 나타내는 수학식 15에서 *H*의 4개 열로 이루어진 부분행렬의 영공간 벡터가 하 나의 패러티식 계수를 구성하도록 하여, 그 센서에 관련된 패러티식이 영이 아닌 값을 가질 때 고장을 진단함을 특징으로 하는 관성측정센서의 비모델 복합고장진단기법.

### 수학식 15

## m(t) = Hx(t) + e + f

여기서, m(t), x(t), e, f와 H는 각각 n 개의 관성측정센서에 대한 측정신호, 동체축에 대한 센서 입력신호, 잡음 신 호, 고장신호 벡터, 그리고 동체축과 센서축 사이의 방향 코사인 벡터.

# 청구항 6.

제1항에 있어서,

상기 웨이블렛 함수는 Daubechies' 4(Db4) 웨이블렛인 것을 특징으로 하는 관성측정센서의 비모델 복합고장진단기법.

# 청구항 7.

제6항에 있어서,

상기 관성측정센서의 신호를 스케일 순위에 따라 근사신호와 상세신호로 반복하여 분해하는 다중 해상도 분해의 상위 스 케일 신호를 사용하여 고장을 진단함을 특징으로 하는 관성측정센서의 비모델 복합고장진단기법.

## 청구항 8.

제7항에 있어서,

상기 관성측정센서 신호의 다중 해상도 분해 각 스케일 신호를 비교하여 고장의 유형을 분리함을 특징으로 하는 관성측정 센서의 비모델 복합고장진단기법.

# 청구항 9.

제1항에 있어서.

상기 이산 웨이블렛 변환의 센서잡음이 분산을 가지는 가우시안(Gaussian) 프로세스인 경우, 고장분리의 한계값을 표준편 차의 3배로 정함을 특징으로 하는 관성측정센서의 비모델 복합고장진단기법.

도면











































