중첩모델 기반 레이저 관성항법장치 고장검출 기법

Fault Detection Method of Laser Inertial Navigation System Based on the Overlapping Model

김 천 중, 유 기 정, 김 현 석, 유 준*

(Cheon-Joong Kim¹, Ki-Jeong Yoo¹, Hyeon-Suk Kim¹, and Joon Lyoo²)

¹Agency for Defense Development

²Chungnam National University

Abstract: LINS (Laser Inertial Navigation System) consists of RLG (Ring Laser Gyroscopes)/accelerometers and provides real-time navigation information to the target system. Therefore it is very important to make a decision in the real time whether LINS is in the normal operation or not. That is called a fault detection method. In this paper, we propose the fault detection method of LINS based on the overlapping model. We also show that the fault detection probability is increased through overlapping the hardware model and the software model. It is verified through the long-term operation and RAM (Reliability Availability Maintainability) analysis of LINS that the fault detection method proposed in this paper is able to detect about 97% of probable system failures.

Keywords: INS, fault detection, RLG, overlapping model

I. 서론

일반적으로 광학식 자이로의 일종인 링레이저 자이로(RLG: Ring Laser Gyroscope)를 탑재한 관성항법장치를 레이저 관성항법장치(LINS: Laser Inertial Navigation System)라 한다[1,6,8-10]. 관성항법장치는 관성 센서를 이용하여 위치, 속도, 자세, 각속도, 가속도 정보를 실시간 제공하는 장비로써, 정밀타격 유도무기 및 무기체계 자동화 목적으로 지상, 해상, 항공, 우주 분야 등 다양한 분야에 공통으로 소요되는 핵심부품이다. 관성항법장치의 오동작은 관성항법장치를 사용하고 있는 무기체계의 심각한 오동작을 유발하게 되므로 관성항법장치의 정상동작 여부를 연속적으로 점검하는 기능은 무기체계 운용관점에서 매우 중요하다[7]. 현재 선진국에서 생산 및 운용되는 관성항법장치는 고장검출 기능을 모두 내장하고 있으며 고장검출 확률 95%이상을 목표로 관성항법장치를 설계/개발하고 있다[7,11-13].

관성항법장치의 고장을 검출하기 위해서는 장비 전원이 가 초기 혹은 장비 운용 중에 연속적으로 검사가 수행되어야 하며, 고장검출을 위한 전자회로 및 알고리즘 등이 개발되어야 한다. 이러한 고장검출을 위한 전자회로 및 알고리즘을 관성항법장치의 고장검출 기법이라 한다.

고장검출 기법의 개발은 기존 선진국에서 운용되고 있는 유사 관성항법장치의 고장검출 성능인 95% 확률을 만족시키기 위하여 레이저 관성항법장치를 구성하는 장비들을 그림 1과 같이 분류하고 각각의 장비들에 대한 고장검출 기

법을 설계하였다. 또한 각 구성품에 대한 고장검출 확률을 높이기 위하여 그림 1 구성품의 정상동작 여부를 하드웨어/소프트웨어를 통하여 판단할 수 있도록 중첩모델 기반의 고장검출 기법을 설계하였다.

관성항법장치는 센서출력의 적분형태인 항법정보를 출력하는 장치로서 센서 및 전자모듈의 기능적인 측면뿐만 아니라 성능적인 측면도 매우 중요한 장치이다. 때문에 레이저 관성항법장치는 기능뿐만 아니라 성능도 규정치를 만족할 수 있도록 항법성능 관련하여 정렬/항법시 관성센서의 성능규격을 고려한 소프트웨어 고장검출 기법을 설계하여 레이저 관성항법장치의 정상동작 여부를 확인할 수 있도록 하였다.

레이저 관성항법장치 고장검출 기법을 실제 구현하기 위하여 전원이 가 초기에 수행되는 SFD (Start-up Fault Detection)와 레이저 관성항법장치를 운용하는 전 구간에서 수행되는 CFD (Continuous Fault Detection) 그리고 성능에 관련되어 수행되는 PFD (Performance Fault Detection)를 구분하였으며, 각각의 고장검출 정보를 점검장비를 통하여 사용자가 쉽게 확인할 수 있도록 고장검출 정보를 그림 2와 같이 3단계로 처리하도록 설계하였다. 구성품의 세부오류정보는 2단계 고장정보인 3개의 16bit 변수(BMONW1, BMONW2, BMONW3)에 고장유형별로 분류되어 연결되며, 2단계 고장정보는 다시 분류되어 1단계의 시스템 상태표시 변수인 관성항법장치 제어정보(INU_CW1)에 출력된다.

본 논문에서는 레이저 관성항법장치의 체계 적용성 및 운용성을 향상시킬 수 있는 하드웨어 및 소프트웨어 고장검출 기법을 중첩하여 적용한 중첩모델 기반 고장검출 기법에 대해 기술한다. 본 논문의 구성을 살펴보면 II 장에서는 레이저 관성항법장치의 기본 구성, 동작원리 및 신호 흐

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2011. 8. 20., 수정: 2011. 9. 5., 채택확정: 2011. 9. 25.

김천중, 유기정, 김현석: 국방과학연구소

(kcj3651@add.re.kr/kjyoo@add.re.kr/hyskim77@add.re.kr)

유 준: 충남대학교 전자공학과(jlyou@cnu.ac.kr)

를 소개하고 III 장에서는 레이저 관성항법장치의 고장 검출 기법 설계결과를 제시하였으며 마지막으로 IV 장에서 본 논문의 결론을 맺는다.

II. 레이저 관성항법장치 시스템 구성 개요

레이저 관성항법장치는 RLG와 실리콘 가속도계를 관성 센서로 사용하는 항법시스템이다. 레이저 관성항법장치의 하드웨어적인 구성도는 그림 1과 같으며, 주요 구성품별 개략 기능은 표 1과 같다.

1. RLG 동작원리 및 구성품

링레이저 자이로는 서로 반대 방향으로 회전하는 두 빛의 상대적 주파수차를 이용하여 회전을 감지하는 센서이다. RLG의 주요 구성품을 살펴보면 광경로를 이루는 모노블럭과, 모노블럭을 진동시키는 몸체진동기(dither), 광 유지에 필요한 전원을 연결하는 음극과 양극, 2개의 평면경, 2개의 구면경, 광경로 길이를 빛의 파장의 정수배로 유지하는 피에조 구동기(piezo actuator), 서로 반대방향으로 진행되는 두 빛을 간섭시키는 프리즘, 간섭무늬를 검출하는 포토 다이오드, 자이로 케이스에 대한 모노블럭의 상대적인 움직임을 검출하는 RAVS (Relative Angular Velocity Sensor) 등으로 이루어져 있다[1-5].

2. 실리콘 가속도계 동작원리 및 구성품

실리콘 가속도계는 실리콘 진자를 사용하는 펜듈럼 방식의 가속도계이다. 실리콘 가속도계의 동작원리는 입력가속도가 실리콘 펜듈럼에 인가되는 상황에서 펜듈럼을 영점

표 1. 레이저 관성항법장치 구성 및 개략 기능.

Table 1. Functional description of LINS components.

세부 구성품	주요기능
RLG	각속도 측정
실리콘 가속도계	가속도 측정
센서제어기 보드	자이로의 아날로그 신호처리
MUX 보드	자이로 관련 신호 취합하여 자이로 인터페이스 보드로 전송
자이로 인터페이스 보드	3축 자이로 신호처리, 제어 및 항법컴퓨터로 출력 제공
가속도계 인터페이스 보드	3축 가속도계 신호처리 및 항법컴퓨터로 출력 제공
항법컴퓨터 보드	정렬/항법/고장검출 기능 수행
통신 보드	외부로 데이터 전송
저전압공급 보드	레이저 관성항법장치 시스템 디지털/아날로그 전원 공급
고전압공급 보드	자이로 구동/제어 전압 공급
GPS 수신기 보드	위성항법정보 획득 및 항법컴퓨터로 데이터 전송
관성센서 조립 마운트, 방진기	외부 환경으로부터 관성센서조립체 보호
하우징 및 커넥터	레이저 관성항법장치 장착 및 시스템 연결

위치로 구동하기 위해, 픽업 단에서 측정된 신호를 증폭, 복조, 신호처리 등을 통해 복원 코일에 전류를 제공한다. 이때 발생된 전류를 측정하여 가속도를 계속한다[8].

3. 레이저 관성항법장치 전자모듈

3.1 센서제어기 보드

센서제어기 보드는 3축 자이로 각각에 독립적으로 장착되어 있으며, RLG의 아날로그 신호처리를 담당하고 있다. 주요 기능은 신호 증폭 및 처리, 전류안정화 회로, PLC (Path Length Control) 구동/제어 회로, 몸체진동기 구동회로 등으로 구성되었다.

3.2 MUX 보드

3개의 센서제어기 보드로부터 취합된 아날로그 신호 등을 취합하여 자이로 인터페이스 보드로 전송하는 기능을 수행한다.

3.3 저/고전압 공급 보드

관성항법장치 동작에 필요한 저전압(+5,±15) 및 RLG 동작에 필요한 고전압(±100,-180,-1000,+3200) 전원을 공급하는 역할을 수행한다.

3.4 자이로 인터페이스 보드

자이로에서 출력되는 모든 신호를 입력받아 자이로 제어를 수행하고 각속도 출력 등을 계산하며, 고장검출 기능을 수행하여 고장정보를 항법컴퓨터로 전송한다.

3.5 가속도계 인터페이스 보드

가속도계 인터페이스 보드는 실리콘 가속도계로부터 입력받은 아날로그 신호를 처리하여 항법컴퓨터에 제공한다.

3.6 항법컴퓨터 보드

입력받은 각종 센서데이터를 이용하여 항법계산을 수행하고 고장검출 프로그램을 구동하여 레이저 관성항법장치에 대한 실시간 감시를 수행한다.

그림 1. 레이저 관성항법장치 구성도.

Fig. 1. Schematic of LINS.

그림 2. 고장검출 정보 처리 방법.

Fig. 2. Processing method of fault detection signal.

III. 레이저 관성항법장치 고장검출 기법

1. 하드웨어 고장검출 기법 개발

레이저 관성항법장치의 고장검출을 위해 개발된 하드웨어 고장검출방법은 크게 3가지 종류로 나눌 수 있다. 첫 번째로 하드웨어 자체에서 고장검출에 필요한 신호를 획득하여 고장검출을 수행한 후 결과를 외부로 전송하도록 설계된 하드웨어와 두 번째로 고장검출에 필요한 신호를 외부로 전송하도록 설계된 하드웨어, 세 번째는 외부와 관계없이 하드웨어 자체적으로 고장검출을 수행하도록 설계된 하드웨어로 나눌 수 있다. 설계된 각각의 하드웨어의 기능을 정리하면 표 2-4와 같고 각각의 기능에 대한 세부적인 설명은 아래와 같다.

1.1 레이저 관성항법장치 하드웨어 고장검출 기능

1.1.1 자이로 출력펄스 고장검출

II 장에서 설명한 바와 같이 RLG 출력은 포토 다이오드를 통하여 측정된 간섭무늬를 출력하며 위상차가 서로 다른 두 신호인 Sin Pulse와 Cos Pulse를 출력한다.

표 2. 레이저 관성항법장치 하드웨어 고장검출 기능.

Table 2. Functional description of hardware fault detection.

하드웨어 고장검출 기능	주요기능
자이로 출력펄스 고장 진단	SIN 펄스에 대한 고장검출
	COS 펄스에 대한 고장검출
	VF 출력에 대한 고장검출
몸체진동기 동작 확인	몸체진동기 정상동작 확인
자이로 방전 확인	자이로 방전 완료 및 유지 확인
PLC 리셋 해제	PLC 모드 변경위한 Reset 신호 해제 확인

표 3. 고장검출을 위해 출력되는 하드웨어 신호.

Table 3. Hardware fault detection signals.

출력 하드웨어 신호	신호 설명
자이로 신호 출력 (LI, DI, PLC)	자이로 동작상태 확인 위한 주요신호 출력
자이로 센서 온도 출력	3축 자이로 각각 3개의 온도정보 출력
BUS 테스트 정보 출력	Local BUS 테스트
고전압 전원 출력	자이로 동작에 필요한 고전압 전원 출력
저전압 전원 출력	시스템 동작에 필요한 전원 출력
가속도계 온도 출력	3축 가속도계의 온도정보 출력

표 4. 하드웨어 자체진단 기능.

Table 4. Hardware self-fault detection function.

하드웨어 자체진단 기능	기능 설명
항법컴퓨터 자체 전압 출력 모니터 및 리셋 기능	항법컴퓨터 자체 전원 상태 모니터 및 시스템 Reset
항법컴퓨터 BUS 고장 자가 검출 및 회복	Local 버스 Hold 고장검출 및 회복 기능

그림 3. 검출부에서 나타나는 간섭파형(SIN, COS).

Fig. 3. Interferometric signals of detector.

포토 다이오드로부터 측정된 SIN과 COS형태의 아날로그 신호는 그림 3과 같은 형태로 나타난다.

그림 3과 같은 파형은 VF (Voltage to Frequency) 변환기를 통하여 이산신호로 변환되며 이는 MUX 보드를 경유하여 자이로 인터페이스 보드로 전송된다. 이 이산신호 파형은 최대 주파수가 약 2MHz 까지 발생할 수 있다. 그림 3의 파형 한주기는 약 2arcsec 정도되고, 펄스로는 2 펄스이다. 몸체진동 각속도가 약 70~130deg/s까지 인가되고, 자이로에 따른 몸체진동 주파수(360Hz~440Hz) 및 입력 외란에 의해 변화할 수 있다. 이런 기준을 적용하면 1/(고속 샘플링 주기) 초 동안의 최소 펄스는 약 20 개가 되고, 각가속도 입력조건까지 마진으로 고려하여 4펄스를 고장 판단 기준으로 삼았다. 하드웨어가 정상인 경우 정지시에는 1/(고속 샘플링 주기) 초 동안 4 펄스 이하로 발생하는 경우는 없으며, 운동중에도 각가속도(100deg/s의 외부 회전 운동) 조건에 의해 4 펄스 이하가 발생하는 경우는 극히 미미하므로 고장을 잘못 검출할 확률은 매우 적다.

1.1.2 몸체진동기 동작 고장검출

초기 시스템 전원인가시 정지 상태에 있는 몸체진동기를 미리 입력된 개략적인 고유주파수에 따라 초기 진동발진모드를 경유하여, 전체 피드백 루프에 의해 안정화 모드에 진입한 후 유지한다. 이때 RLG의 최적성능을 유지하기 위해 발진 주파수는 유지하고 진폭을 일정 범위내에서 계속 변화시키게 되므로, 몸체진동기가 계속 동작하는지 감시한다.

일반적으로 몸체진동기 주파수 범위는 360~440Hz의 범위를 가지므로 1/310초 동안 1회 미만의 몸체진동기 zero-rate 신호 발생시 몸체진동기 고장신호를 발생한다.

1.1.3 자이로 방전 고장검출

RLG는 광경로내에 좌회전/우회전 빛의 상대적인 주파수 차로부터 각속도를 검출하므로 지속적으로 레이저 발진을 유지해야 한다. 시스템 전원 인가시에는 초기 레이저 발진을 위해 약 +3200V 전압을 인가하여 레이저 발진을 유도하고, 이후에는 레이저 발진을 지속시키기 위해 -1000V를 이용한다. 매우 짧은 순간 동안이라도 하드웨어에 이상이 있어서 레이저 발진을 유지하지 못하면, 이후에는 -1000V만으로는 광원을 발생시키지 못하므로 자이로로써의 기능을 상실한다.

1.1.4 PLC Reset 고장검출

시스템 전원 인가 후 자이로 방전이 완료 된 후 자체적으로 PLC Reset을 인가하여 PLC가 중심 모드에서 동작할 수 있도록 하고, 이후 항법컴퓨터 보드에 의한 PLC Offset 조정을 위하여 Reset을 인가한다. PLC Reset이 인가된 상태에서는 비정상 자이로 출력이 나오므로 PLC Reset 상태를 계속 감시한다.

1.1.5 고장검출을 위해 출력되는 하드웨어 신호

자이로 공급전압과 관련된 정보는 AD (Analog to Digital) 변환되어 순차적으로 출력되며 이러한 정보를 이용하여 자이로에 대한 고장검출이 가능하다. 본 절에서는 LI (Laser Intensity), DI (Current Difference), VPLC, VDIS, VDTH에 대한 기능 및 고장검출 기준을 기술한다. LI는 광원의 밝기를 나타내는 지수이며 DI 신호는 전류안정화 제어기에 의해 유지되고 있는 좌우 방전전류(통상 300uA)의 차이로 VPLC는 현재 유지되고 있는 광경로의 모드를 나타내며, 약 6~7 모드 이내에서 운용가능하고 중심모드에서부터 온도변화에 의해 증가 또는 감소한다. 이러한 신호는 자이로의 정상동작 여부를 판단하기 위한 주요 신호로 센서제어기 보드에서 전압형태로 측정되어 AD 변환된 후 항법컴퓨터 보드로 전송된다.

(가) LI 고장검출

LI는 광원의 밝기를 나타내는 지수로써, 통상 전 온도범위에서 정상동작범위는 약 2.0V - 5.0V 이내이다. 상온에서 통상 약 3.0 - 4.5V 수준이고, 자이로 내부의 가스 밀봉 상태가 변화하거나 방전유지 전류(약 300uA)를 공급하지 못하는 경우 급격히 떨어진다. 실험적 방법에 의하면 노노블릭 내부의 헬륨-네온 가스의 방출로 인한 LI의 변화가 1.5V 이하로 감소하는 경우에 자이로의 광학노이즈가 정상적인 경우에 비해 약 2배 정도 증가하는 것으로 알려져 있으며, 자이로의 성능 변화가 예상된다. 성능 안정도 마진을 고려하여 2.0V를 정상동작 범위로 한다.

(나) DI 고장검출

자이로의 광경로에 반대 방향으로 레이저를 가해주기 위해 RLG의 양 방향으로 나와 있는 Cathode에서 한 개의 Anode로 일정한 전류가 흐르게 되는 데 두 전류의 차를 각각 5K의 저항을 이용하여 전압으로 변환하고 그 차이를 100배 증폭하여 AD 변환하여 출력한다. DI 신호는 전류안정화 제어기에 의해 유지되고 있는 좌우 방전전류(통상 300uA)의 차이로써 4uA이내를 규격으로 한다.

(다) PLC 전압 고장검출

PLC 제어를 위해 공급되는 전압고장으로서 PLC를 구성하는 구동기의 초기위치에 따라 전압이 달라진다. 이 전압은 5 Volt가 최대로 이 값의 의미는 자이로의 광로를 제어하기 위한 여유가 없음을 의미하며 0 Volt 근처의 값을 유지하여야 한다. 이 값은 온도가 증가함에 따라 광로의 길이가 팽창하면 이 값도 동시에 증가하기 때문에 광로 제어를 위한 전압 여유가 줄어 자이로의 기능에 문제가 발생하므로 이에 대한 제한 조건이 필요하다. 그러므로 레이저 관성항법장치를 장시간 운용하기 위해서는 PLC 제어 전압에 대한 여유가 충분한가에 대한 확인이 필요하다. PLC 전압

에 대한 고장검출은 PLC 전압에 대한 규정치를 선정하여 측정된 PLC 전압 데이터와 비교하여 이상여부를 확인한다.

(라) VPLC 전압 고장검출

광경로 제어기의 입력되는 PLC 제어 전압을 power amp를 통해 증폭(60배)하기 위해 제공되는 -180V 기준 전압으로 실제 1M와 12K의 저항으로 분압하여 12K에 걸리는 전압을 AD 변환하여 출력한다. $\pm 2.5V$ 의 PLC 제어 여유를 고려하여 VPLC 전압은 -150V(-2.5V)를 규정치로 하였다.

(마) VDIS(방전 전압) 고장검출

RLG 방전 전압을 약 1/350으로 분압하여 AD 변환하여 출력한다. Nominal 값이 -980V이며 $\pm 180V$ 범위를 벗어나면 심각한 문제를 초래할 수 있다. 실제 AD 변환된 출력값은 마이너스 값으로 나오므로 부호변환을 고려하여 기준값을 설정하여야 한다.

(바) VDTH(몸체진동기 전압($\pm$)) 고장검출

몸체진동기 제어기의 power amp에 공급되는 전원의 전압을 1M와 20K의 저항으로 분압하여 20K에 걸리는 $\pm$ 전압을 AD 변환하여 출력한다.

(사) 저전압 공급 고장검출

시스템에서 사용되는 디지털 회로 및 아날로그 회로에서 사용되는 5V 및 $\pm 15V$ 에 대해 가속도계 인터페이스 보드에서 AD 변환하여 항법컴퓨터로 전송되며 항법컴퓨터는 전압이 오차 허용범위내에 있는가를 확인하여 정상동작 여부를 판단한다.

(아) 고전압 전원 출력-자이로 공급전압 고장검출

자이로의 구동 및 제어에 필요한 고전압 전원은 다음과 같다.

+3200V : 자이로 초기 방전 유도

-1000V : 자이로 방전 유지

-180V : PLC 구동 전원

$\pm 100V$: 몸체진동기 구동전원

이 전원 중 +3200V는 시스템 전원 인가 초기에만 사용되고, 전원에 이상이 있는 경우에는 자이로 방전이 이루어지지 않으므로 전원 모니터에서 생략되었고, 나머지 3가지 전원에 대해서 저항으로 분주한 후 자이로 인터페이스 보드에서 AD 변환하여 항법컴퓨터로 전송한다.

1.1.6 자이로/가속도계 온도 출력-온도센서 고장검출

자이로 3축 각각에 4개의 온도 센서가 장착되어 있고, 자이로 내부의 평균 온도 및 온도 구배를 측정한다. 각 자이로로부터 출력되는 온도 센서값은 센서제어기 보드, MUX 보드 등을 경유하여 자이로 인터페이스 보드에서 AD 변환된 후 항법컴퓨터 보드로 전송된다.

가속도계 3축에 각각 장착되어 있는 온도센서의 출력을 가속도계 인터페이스 보드에서 AD 변환하여 항법컴퓨터로 전송한다.

1.1.7 BUS 테스트 정보 출력-자이로 버스 고장검출

마더 보드에 포설되어 있는 Local BUS를 시험 할 목적으로 가속도계/자이로 인터페이스 보드에 특정 어드레스와 특정 데이터를 Read Cycle과 Write Cycle을 반복하여 BUS의 이상 유무를 확인한다.

1.1.8 하드웨어 자체진단 신호 고장검출

(가) 항법컴퓨터 자체전압 출력 모니터 및 리셋 기능

항법컴퓨터 보드는 전원모듈로부터 5V 디지털 전원을 공급받아 내부에서 3.3V를 만들고, 3.3V를 이용하여 다시 2.0V를 만든다. 항법컴퓨터 보드내의 대부분 소자가 3.3V를 사용하고 있고, 3.3V 전원이 2.9V이하로 감소하는 경우에는 항법컴퓨터가 이상 동작 하므로, 자체 Reset 제어 소자의 전원감시 기능을 통해 프로세서에 Reset을 인가한다.

(나) 항법컴퓨터 BUS 자가 고장검출 및 회복

항법컴퓨터 보드내의 프로세서는 RAM, ROM, 외부 I/O 소자등과의 데이터 교환을 위해 BUS cycle을 구동한다. 이때 특정 소자에 대한 BUS cycle에서 응답이 없는 경우 BUS가 계속 pending되어 프로세서가 더 이상 프로그램 진행을 할 수 없게 된다. 이를 방지하기 위해 일정 시간 이상 BUS cycle이 pending 되면, Watch-Dog timer가 작동하여 BUS cycle을 강제로 종료한다.

2. 소프트웨어 고장검출 기법 개발

본 절에서는 센서 출력 정보를 이용한 소프트웨어 고장검출 기법에 대해 기술한다.

2.1 자이로 성능 고장검출 기법

식 (1)에서 C_b^m 은 좌표변환행렬이며 이를 롤(ϕ), 피치(θ), 헤딩(ψ) 각의 수식으로 자세히 나타내면 식 (2)와 같이 유도된다. 일반적으로 정지상태에서 항법좌표계에서 레이저 관성항법장치는 지구회전 각속도(Ω) 성분만을 측정하게 된다. 그러나 지구는 자전축을 기준으로 회전하므로 레이저 관성항법장치 위치에서 항법좌표계에서의 지구회전각속도 성분은 위도(L)와 지구회전각속도 성분으로 식 (3)과 같이 계산된다. 식 (3)의 내적의 합을 식 (4)와 같이 구하면 지구회전 각속도와 일치함을 확인할 수 있다. 그러나 레이저 관성항법장치의 경우 항법좌표계에서의 각속도를 계산하기 위해서는 긴 시간동안의 정렬과정을 거쳐야하기 때문에 RLG의 고장 유무를 빠른 시간내에 판단하기 위해서는 동체좌표계에서 측정되는 각속도 측 RLG에서 출력되는 각속도에 대한 판단기준이 필요하였다. 이를 위하여 식 (1)의 양변에 좌표변환행렬을 곱하여 ω^b 에 대하여 식 (5)와 같이 정리한 후 ω^b 의 내적의 합을 구하면 식 (6)과 같이 유도되며 식 (4)와 같이 동일한 결과가 계산됨을 확인하였다. 위와 같은 사실에 근거하여 식 (7)과 같이 자이로 고장을 검출한다. 이 방법은 각 축의 자이로에 대한 고장검출은 불가능하나 정지상태가 오래 지속되는 시험에서는 내적의 합을 이용하여 전체적인 자이로 성능 판단이 가능하기 때문에 자이로 성능지수로 현재 활용되고 있다.

$$\omega^n = C_b^m \omega^b \quad (1)$$

$$C_b^m = \begin{bmatrix} \cos\theta\cos\psi & \sin\phi\sin\theta\cos\psi - \cos\phi\sin\psi & \sin\phi\cos\theta \\ \cos\theta\sin\psi & \sin\phi\sin\theta\sin\psi + \cos\phi\cos\psi & \sin\phi\sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\phi\sin\theta\cos\psi + \sin\phi\sin\psi & \cos\phi\sin\theta \\ & \cos\phi\sin\theta\sin\psi - \sin\phi\cos\psi & \cos\phi\cos\theta \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\omega^n = \begin{bmatrix} \omega_N \\ \omega_E \\ \omega_D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Omega \cos L \\ 0 \\ -\Omega \sin L \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\sqrt{\omega_N^2 + \omega_E^2 + \omega_D^2} = \Omega \quad (4)$$

$$\omega^b = \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} = C_n^b \omega^n \quad (5)$$

$$\sqrt{\omega_x^2 + \omega_y^2 + \omega_z^2} = \Omega \quad (6)$$

$$\sqrt{\hat{\omega}_x^2 + \hat{\omega}_y^2 + \hat{\omega}_z^2} - \Omega > \text{Lim 이면 고장} \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} \hat{\omega}_x \\ \hat{\omega}_y \\ \hat{\omega}_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_x + \delta\omega_x \\ \omega_y + \delta\omega_y \\ \omega_z + \delta\omega_z \end{bmatrix}$$

2.2 정렬위도 고장검출 기법

본 고장검출은 정지상태에서 수행되는 자체정렬시 정렬의 기본원리를 이용한 고장검출 기법이다. 자체정렬의 기본원리는 정지상태에서 가속도계에서 출력되는 가속도 성분(f^b)이 좌표변환행렬을 통하여 항법좌표계에서의 가속도 성분으로 계산되면 이 계산치와 항법좌표계에서 이론적으로 계산된 가속도 성분과의 차가 영이 되도록 정렬루프에서 제어신호를 생성한다. 이 제어신호가 항법좌표계에서의 계산된 지구회전각속도이며 이 값과 RLG에서 측정된 각속도를 이용하여 좌표변환행렬 C_b^m 을 계산한다. 이 과정에서 이론적으로 계산된 항법좌표계에서의 각속도를 식으로 나타내면 식 (8)과 같고 정렬루프에서 계산된 제어신호에 대한 이론적인 예측치를 수식으로 나타내면 식 (9)와 같다. 식 (8)에서 g 는 중력가속도이고 식 (9)에서 L 은 정렬전 레이저 관성항법장치에 입력된 위도값, ϕ_Z 는 정렬에서 추정되는 헤딩각이다. 좌표변환행렬 C_b^m 은 정렬루프에서 계산된 제어신호와 RLG에서 측정된 각속도 성분을 이용하여 식 (10)과 같이 계산된다. 위와 같이 정렬루프에 동작원리에 의해 계산된 제어신호인 식 (9)의 두식에 대한 RSS를 취하면 지구회전각속도와 입력위도의 함수로 계산되기 때문에 실제 레이저 관성항법장치 정렬루프에서 계산된 제어신호와 입력위도를 이용하여 계산된 값과의 차를 이용하여 식 (11)과 같이 레이저 관성항법장치의 고장검출이 가능하다. 정렬위도 고장검출 기법을 그림으로 나타내면 그림 4와 같다.

$$\Omega_N = \Omega \cos \phi$$

그림 4. 정렬 위도 고장검출 기법.

Fig. 4. Align latitude fault detection technique.

$$f^n = \begin{bmatrix} f_N \\ f_E \\ f_D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \omega_N &= \Omega \cos L \cos \Phi_Z \\ \omega_E &= \Omega \cos L \sin \Phi_Z \end{aligned} \quad (9)$$

$$\dot{C}_b^m = C_b^m \Omega^b - \Omega^n C_b^m \quad (10)$$

$$\sqrt{\omega_N^2 + \omega_E^2} - \Omega \cos L > \text{Lim} \text{ 이면 고장} \quad (11)$$

2.3 가속도계 성능 고장검출

자이로 성능 고장검출 기법과 유사한 방법으로 가속도계 성능 고장검출을 수행한다. 먼저 동체 좌표계에서 측정되는 3 축의 가속도계 측정치를 f^b 라 하고 항법좌표계에서의 가속도 성분을 f^n 이라 하면 식 (2), (5)를 이용하여 관계식을 유도하면 식 (12)와 같다. 식 (12)에 식 (8)의 f^n 과 식 (2)의 C_b^n 를 대입하여 정리하면 식 (13)과 같이 이론적으로 계산된 동체좌표계에서의 가속도 성분이 유도된다. 식 (13)의 동체좌표계에서 가속도 성분에 대한 내적의 합을 구하면 중력 가속도와 일치함을 확인할 수 있다. 이러한 사실에 근거하여 식 (15)와 같이 가속도계 고장검출을 수행한다. 식 (14)에서 나타난 바와 같이 이론적으로 계산한 가속도 성분은 중력 가속도와 일치함이 증명되나 실제로는 가속도계에서 측정되는 가속도 성분에는 여러 가지 오차요인들이 포함되어 있으며 이를 고려하여 동체좌표계에서 가속도 성분을 나타내면 식 (16)과 같다. 식 (16)에서 δ 성분은 가속도계 오차요인으로 식 (16)에 대한 내적의 합을 구하면 식 (17)과 같다. 식 (17)에서 나타난 바와 같이 내적의 합을 연속적으로 구하는 경우에는 이를 이용하여 가속도계의 성능 판단이 가능하기 때문에 이를 가속도계 성능지수로 활용하고 있다. 이 고장검출 기법은 내적의 합을 이용하기 때문에 각 축별 가속도계에 대한 고장검출은 불가능하다. 가속도계 성능 고장검출 기법을 그림으로 나타내면 그림 5와 같다.

$$f^b = C_b^n f^n \quad (12)$$

$$f^b = \begin{bmatrix} f_x \\ f_y \\ f_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -g \sin \theta \\ g \sin \phi \cos \theta \\ g \cos \phi \cos \theta \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\sqrt{f_x^2 + f_y^2 + f_z^2} = g \quad (14)$$

$$\sqrt{f_x^2 + f_y^2 + f_z^2} - g > \text{Lim} \text{ 이면 가속도계 고장} \quad (15)$$

그림 5. 가속도계 성능 고장검출 원리.

Fig. 5. Principle of Accelerometer fault detection.

$$\hat{f}^b = \begin{bmatrix} \hat{f}_x \\ \hat{f}_y \\ \hat{f}_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x + \delta f_x \\ f_y + \delta f_y \\ f_z + \delta f_z \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$\sqrt{\hat{f}_x^2 + \hat{f}_y^2 + \hat{f}_z^2} = g \quad (17)$$

2.4 관성센서무치 가속도계 고장검출

고속 샘플링 주기 및 200 Hz 측정된 가속도 값이 규정치를 초과하면 고장이 발생된다. 이 고장검출은 가속도계 데이터 획득시 발생하는 데이터 오류를 검출하기 위한 것이다.

2.5 관성센서무치 각속도 고장검출

고속 샘플링 주기 및 200 Hz 측정된 각속도 값이 규정치를 초과하면 고장이 발생된다. 이 고장검출은 자이로 데이터 획득시 발생하는 데이터 오류를 검출하기 위한 것이다.

2.6 FFT 이용 RLG/가속도계 고장검출

RLG는 고유의 특성인 lock-in을 제거하기 위하여 강제적으로 400Hz 주기에 약 100 deg/sec의 크기의 강제 진동을 인가한다. 위와 같은 몸체진동 운동에 의한 정현파 운동은 다른축의 자이로 및 가속도계에 신호를 발생시킨다[4].

3개의 RLG 각각의 몸체진동에 의해 자이로 및 가속도계에 발생하는 측정치를 모델링하면 아래와 같다. 관성센서무치 구성시 3개의 RLG의 몸체진동 주파수는 400Hz를 기준으로 하여 축간 상호간섭을 피하기 위하여 약 30 Hz 정도 차이를 두고 축 선정을 하며 대략 370, 400, 430Hz 부근에 몸체진동 주파수가 설정된다. 먼저 자이로 출력을 살펴보면 자이로는 다른 두 축에 설치된 자이로의 몸체진동 주파수와 차에 해당하는 주파수를 가진 정현파 진동이 측정된다. 그리고 가속도계의 경우 자이로와 한 몸체에 장착되므로 자이로의 몸체진동에 의한 정현파 진동이 측정된다. 이와 같은 사실을 근거로 하여 몸체진동 운동에 대한 RLG/가속도계 측정치를 모델링하면 식 (18), (19)와 같다[4].

$$\begin{aligned} G_x &= G_{xy} \sin(2\pi|f_x - f_y|t + \theta_{xy}) + G_{xz} \sin(2\pi|f_x - f_z|t + \theta_{xz}) \\ &\quad + G_{yz} \sin(2\pi|f_y - f_z|t + \theta_{yz}) \\ G_y &= G_{yx} \sin(2\pi|f_y - f_x|t + \theta_{yx}) + G_{yz} \sin(2\pi|f_y - f_z|t + \theta_{yz}) \\ &\quad + G_{xz} \sin(2\pi|f_x - f_z|t + \theta_{xz}) \\ G_z &= G_{zx} \sin(2\pi|f_z - f_x|t + \theta_{zx}) + G_{zy} \sin(2\pi|f_z - f_y|t + \theta_{zy}) \\ &\quad + G_{xy} \sin(2\pi|f_x - f_y|t + \theta_{xy}) \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} A_x &= A_{xx} \sin(2\pi f_x t + \theta_{xx}) + A_{xy} \sin(2\pi f_y t + \theta_{xy}) \\ &\quad + A_{xz} \sin(2\pi f_z t + \theta_{xz}) \\ A_y &= A_{yx} \sin(2\pi f_x t + \theta_{yx}) + A_{yy} \sin(2\pi f_y t + \theta_{yy}) \\ &\quad + A_{yz} \sin(2\pi f_z t + \theta_{yz}) \\ A_z &= A_{zx} \sin(2\pi f_x t + \theta_{zx}) + A_{zy} \sin(2\pi f_y t + \theta_{zy}) \\ &\quad + A_{zz} \sin(2\pi f_z t + \theta_{zz}) \end{aligned} \quad (19)$$

위 식에서 f_x, f_y, f_z 는 x, y, z축 RLG의 몸체진동 주파수이다.

식 (18), (19)와 같이 이론적/실험적으로 분석된 정지상태에서의 RLG/가속도계 측정치 모델은 레이저 관성항법장치

그림 6. X축 가속도계 측정치 FFT 결과.

Fig. 6. FFT result of measurements from X-axis accelerometer.

그림 7. X축 자이로 측정치 FFT 결과.

Fig. 7. FFT result of measurements from X-axis gyroscope.

의 고유 특성이며 RLG/가속도계의 정상동작 여부를 판단하기 위한 고장검출 기법에 사용가능하다. 이러한 방법은 앞에서 설명한 내적의 합을 이용한 RLG/가속도계 측정치를 성능고장검출 기법이 축별 고장검출이 불가능한 것에 반하여 각 축별로 고장검출이 가능하기 때문에 레이저 관성항법장치의 주요 핵심부품인 관성센서의 신뢰도 향상에 크게 기여할 것으로 판단된다.

RLG/가속도계 측정치에 대한 FFT 결과를 그림으로 나타내면 그림 6, 7과 같다. 고장검출은 레이저 관성항법장치 교정시험시 입력된 몸체진동 주파수와 FFT를 통하여 실시간으로 계산된 RLG/가속도계 몸체진동 주파수간의 차가 규정치내에 있는가를 확인하여 고장검출을 수행한다[4].

2.7 온도센서 고장검출

관성센서에 적용된 온도센서는 각축의 자이로 및 가속도계마다 한 개씩 총 6개의 온도 센서가 사용되기 때문에 이 온도센서에 대한 정상동작 여부를 판단하기 위한 고장검출 및 고장회피 기법 설계를 수행하였다. 온도센서에 대한 고장검출에 사용되는 프로그램은 필터를 통과한 값이므로 갑작스러운 점프 등이 발생하더라도 200 Hz로 고장을 검사할 경우 고장이 검출되지 않을 가능성이 있고 또한 온

도센서 데이터의 필터링을 0.1 Hz로 하기 때문에 최소한 필터에 의한 온도 안정화 시간을 포함하여 온도센서에 대한 고장검출 주기를 15초로 선정하였다. 온도센서의 고장 유형별로 고장검출 및 고장배제에 대한 개발 내용을 정리하면 아래와 같다.

2.7.1 동작 초기부터 고장이 존재하는 경우

이 경우의 온도 고장검출은 가속도계 및 자이로의 온도센서를 구분하여 고장검출이 수행된다. 일반적으로 RLG/가속도계로 구성된 관성센서모치는 설계시 온도구배가 전 공간에서 유사하도록 설계되었기 때문에 3개의 RLG/가속도계에서 측정된 온도는 유사한 온도곡선을 가지게 된다. 이러한 사실을 근거로 하여 온도센서에 대한 고장검출이 가능하며 고장검출은 RLG/가속도계 각각 3개의 온도센서에 대한 표준편차를 계산하여 이 값이 제한 범위를 벗어나는 경우에 고장을 선언하도록 설계하였다. 제한범위는 여러 종류의 시험치 및 RLG/가속도계 성능을 고려하여 설정하였다.

2.7.2 동작 중에 온도센서가 고장인 경우

이 경우에는 온도센서가 정상 동작하다가 온도 센서가 오동작하는 경우이며 이 경우에는 갑작스런 온도 변화가 예상되기 때문에 전 측정치와 현재 측정치의 차가 제한범위를 벗어나는 경우 고장을 선언한다.

2.7.3 온도센서 제한 범위 초과 고장

각 온도센서에서 출력되는 온도가 동작 온도범위에 있는지를 검사하여 초과하는 경우 고장을 선언한다.

2.7.4 온도센서에 대한 고장배제 기능

온도 센서는 각 축에 해당되는 관성센서에 대해서 최소한 1개 이상을 가지고 있으므로 위의 3가지 온도 고장 중에 한 개의 고장이 발생한 경우에 이를 배제하고 정상으로 동작되는 온도센서의 값으로 이를 대체하여 사용할 수 있기 때문에 이에 대한 기능을 레이저 관성항법장치 고장검출 프로그램에 포함시켰다. 고장배제를 위한 로직은 먼저 온도센서 고장이 감지되면 다른 두 축에 대한 정상동작 여부를 판단하여 순서에 맞도록 고장 온도센서 값을 정상동작 온도센서 값으로 대체하여 교정값 계산시 사용하도록 로직을 설계하였다.

2.7.5 온도센서 고장검출 기법 검증 시뮬레이션

위에서 설명한 RLG/가속도계 온도센서에 대한 고장검출 및 고장배제 기법에 대한 검증을 수행하기 위하여 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션은 레이저 관성항법장치 동작 900 초에 Z축 가속도계 온도센서 데이터가 비정상적으로 동작하는 경우를 가정하여 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 결과를 그림으로 나타내면 그림 8~11과 같다. 그림 14는 Z축 가속도계 온도센서 고장을 나타내는 그림이며 그림 15, 16은 Z축 가속도계 온도센서 고장과 관련된 변수에 “가속도계 온도제한범위 초과 고장발생, 가속도계 온도 비정상 고장 발생”이, 그림 8의 변수에는 “Z축 가속도계 온도 제한범위 초과 고장”이 발생함을 나타내는 그림이며 그림 11은 고장배제 변수에 “Z축 가속도계 온도를 Y축 온도로 대체”가 발생함을 나타내는 그림이다. 그림 8~11에서 나타난 바와 같이 온도센서에 대한 고장검출 및 배제 기능은 정상동작함을 시뮬레이션을 통하여 확인하였다.

그림 8. Z축 가속도계 온도센서 고장.

Fig. 8. Temperature sensor fault of X-axis accelerometer.

그림 11. 온도센서 고장 배제 변수 출력.

Fig. 11. Fault isolation result of temperature sensor.

그림 9. 온도 센서 고장검출 출력.

Fig. 9. Fault detection result of temperature sensor.

그림 10. 온도제한범위 초과 고장검출 출력.

Fig. 10. Fault detection result of temperature output over measurement limit.

2.8 자이로 고장검출

2.8.1 초기에 한번만 발생하는 고장(SFD)

이 기능은 전원이 인가되어 항법 프로그램의 주 인터럽트가 발생되기전에 수행되는 고장검출 기능으로 일정한 시간이 경과하여도 제한 조건을 만족하지 못하는 경우에는 이 기능에 고장을 선언하고 종료된다.

(가) 자이로 몸체진동기 이득 고장

자이로 이득 고장은 자이로의 몸체진동기 진폭이 랜덤하게 변화되어야 RLG가 작은 값의 각속도를 측정할 수 있기 때문에 자이로 몸체진동기 이득 시험을 통하여 몸체진동기 진폭이 임의로 변경되는 가를 확인한다.

(나) 자이로 버스 고장

자이로 버스 고장은 자이로 인터페이스 카드에서 일정한 값을 항상 출력해 주기 때문에 이 값을 항법 컴퓨터에서 읽어 기준값과 비교하여 항법 컴퓨터와 자이로 인터페이스 카드사이에 연결되어 있는 버스의 이상유무를 진단한다.

(다) 자이로 몸체진동기 주파수 고장

앞에서 언급한바와 같이 레이저 관성항법장치는 제작시 레이저 관성항법장치를 구성하는 3축의 RLG 몸체진동 주파수를 일정한 간격이상으로 설정하여 장착한다. 몸체진동 주파수는 RLG의 고유한 값으로 온도에 따라 약간은 변경될 여지는 있지만 과도한 변화는 RLG의 이상을 나타낸다. 특히 초기에 입력된 몸체진동 주파수를 이용하여 유도조종에 사용되는 각속도 정보를 계산하기 때문에 몸체진동 주파수의 과도한 변화는 유도탄의 유도조종에 많은 영향을 미친다. 몸체진동 주파수에 대한 고장검출은 입력된 주파수와 자이로에서 측정된 정보를 이용하여 계산된 몸체진동 주파수를 비교하여 규정치를 초과하는 가를 확인하여 고장검출을 수행한다.

2.8.2 동작중 주기적으로 수행되는 고장검출

자이로는 자이로 인터페이스 카드에서 자이로의 상태를 나타내주는 2개의 변수를 가지고 있다. 그러므로 이 변수를 주기적으로 검사하여 자이로에 고장 발생 여부를 확인할 수 있다. 첫 번째 상태변수는 X, Y축 자이로를, 두 번째 상

태변수는 Z축 자이로에 대한 상태를 나타내며 이 값은 고속 샘플링 주기로 계속해서 항법 컴퓨터에서 점검된다. 자이로 상태 변수에 대한 정상동작 판정기준은 아래와 같다.

- ※ 몸체진동기 On: 몸체진동기 ZA (Zero Angle) Pulse가 0.1초 내에 30개 이상 Count시 On
- ※ PLC On: PLC Reset 발생시 Off(Low 상태)
- ※ Ignition On: 정상적으로 RLG가 방전되지 않을시 Off (Low 상태)
- ※ Sin, Cos, VF: 고속 샘플링 주기에 확인하여 연속으로 10개 이상 Count시 On
- ※ Ignition All : X, Y, Z축 모두 방전 되었을 경우 On

2.9 통신 고장검출

2.9.1 MIL-STD-1553B 통신 고장검출

MIL-STD-1553B 통신의 초기화시 발생하는 고장을 검출한다. 또한 MIL-STD-1553B 통신 방식은 통신 과정에서 자체적인 점검을 수행하여 그 결과를 임의의 저장 주소에 저장하는 기능이 존재하며 이 값을 외부 통신 중에 연속적으로 읽어 통신 고장의 유무를 판단한다.

2.9.2 RS232C 통신 고장검출

RS232C 통신의 초기화가 완료된 후 자체적인 loopback 시험을 통하여 고장 여부를 판단한다.

2.10 컴퓨터 고장검출

2.10.1 타스크(Task) 고장검출

실시간 운영체제인 vxWorks에서 타스크를 생성하고 이를 실행하는 함수인 taskSpawn() 함수에서 타스크 실행시 고장 발생여부를 출력하기 때문에 이를 이용하여 타스크에 대한 고장검출을 수행한다.

2.10.2 Semaphore 고장검출

실시간 운영체제에서는 생성된 각각의 타스크를 주기적으로 수행하기 위해 타스크간 통신방식인 Semaphore를 이용하며, 타스크간 서로 이를 주고받을 때에 발생하는 고장의 발생여부를 확인한다.

2.10.3 메모리 고장검출

항법 컴퓨터에 전원이 인가되면 프로그램을 수행하기 전에 메모리를 초기화하고 프로그램 실행에 필요한 정보를 ROM에서 RAM으로 복사하는 작업을 수행한다. 특히 레이저 관성항법장치는 실시간 운영체제 구성시 항법 컴퓨터의 실행시간을 빠르게 하기 위하여 프로그램의 실행을 ROM에서 수행하지 않고 RAM에서 수행하도록 구성하였기 때문에 메모리 초기화시 프로그램도 같이 RAM으로 복사된다. 이 때에 RAM 및 ROM에 대한 고장 발생여부를 확인한다.

2.11 GPS 수신기 고장검출

레이저 관성항법장치는 GPS 수신기를 카드 형태로 내장하고 있으며 이에 대한 고장검출을 수행한다. GPS 수신기에 대한 고장검출은 GPS 수신기 내부에서 자체적으로 수행하는 고장검출 결과와 GPS 수신기와 레이저 관성항법장치의 항법 컴퓨터 사이의 시각동기를 위해 사용되는 1PPS 신호에 대한 고장검출로 나눌 수 있다. 전자는 GPS 자체의 안테나, 메모리 등에 대한 고장검출 결과를 GPS 수신기가 항법 컴퓨터에 전송하며 후자는 PPS 인터럽트 입력시 증가되는 타이머와 레이저 관성항법장치의 항법 컴퓨터에서 계

산된 시간을 15초마다 비교하여 15초 이상의 시간차가 발생한 경우에 관련 고장정보를 발생시킨다.

2.12 기압고도계 고장

레이저 관성항법장치의 고도정보에 대한 안정화를 위하여 외부 보조장비인 기압고도계에서 입력되는 고도정보를 이용한다. 고도정보에 대한 고장검출은 고도계에서 입력되는 자체 고장검출 정보와 입력되는 고도의 정밀도를 이용하여 고도정보에 큰 점프오차가 존재하는 가를 확인하여 고장검출을 수행하는 두 가지 방법으로 나뉘어져 있으며 두가지 모두 실시간으로 수행된다.

2.13 FROM (Flash ROM) 시험

레이저 관성항법장치는 전원인가 초기에 관성센서에 대한 교정정보 및 고장검출 수행을 위한 많은 정보를 FROM에서 읽어와 관련변수에 저장하는 기능을 수행한다. 이 과정에서 이러한 정보에 고장이 발생하는 경우 레이저 관성항법장치의 성능 및 고장검출 기법에 영향을 미치기 때문에 레이저 관성항법장치 교정시험에서 FROM에 데이터 교정 데이터 저장시 4개의 정보마다 Check-Sum 고장점검이 가능하도록 데이터 저장이 이루어지므로 레이저 관성항법장치 전원인가 초기에 데이터가 저장된 FROM 영역에 대한 Check-Sum 시험을 통하여 FROM에 저장된 데이터의 이상여부를 확인한다.

2.14 수평측, 수직측 가속도계 고장

레이저 관성항법장치의 정렬이 어느 정도 진행된 후 항법 좌표계에서 계산되는 가속도 성분은 식 (8)에서와 같이 수평측은 0의 값이 출력되어야 하며 수직측은 1g가 출력되어야 한다. 이러한 이론적인 근거를 바탕으로 하여 정렬 루프에 대한 고장검출을 수행한다. 고장검출은 레이저 관성항법장치의 몸체진동 운동을 고려하여 항법 좌표계에서의 30초간 가속도 평균을 계산하고 이를 이론적으로 계산한 규정치와 비교하여 레이저 관성항법장치 정렬의 정상동작 여부를 확인한다. 이 고장검출 방법은 정렬위도 고장검출 방법이 정렬이 충분히 진행된 후 자이로 성능위주로 고장검출이 이루어지는 반면에 정밀정렬 전 구간에서 가속도계 측정치 자체에 대한 고장검출 및 정렬루프에서 계산된 자세정보에 대한 유효성까지 함께 고장유무를 판단할 수 있어 매우 유효한 고장검출 기법이다.

IV. 결론

앞에서 기술한 레이저 관성항법장치의 고장검출 기법 개발을 통하여 레이저 관성항법장치를 구성하는 각 장비에 대한 고장검출 상황을 종합하면 표 5와 같다. 표에서 나타난 바와 같이 설계된 고장검출 기법은 레이저 관성항법장치를 구성하는 장비에 대한 고장검출 확률을 높이기 위하여 하드웨어 및 소프트웨어 기반의 고장검출 기법이 중첩되어 적용되도록 설계하였다. 즉 하드웨어적인 고장검출 기법을 통해 각 구성품의 기능적 오류가 검출가능하며, 또한 센서 및 전자모듈의 성능 관점에서도 항법알고리즘에 기반을 둔 소프트웨어 고장검출 기법이 적용되었다. 개발된 고장검출 기법은 자체 검증/시험평가를 통하여 우선 성능을 확인하였으며 개발기간 동안 수행된 자체점검, 차량 탑재시

표 5. 레이저 관성항법장치 구성 장비별 구현된 고장검출 종류.

Table 5. Summary of fault detection types according to LINS components.

레이저 관성항법장치 구성장비		고장검출 종류		
		SFD	CFD	PFD
관성센서 조립체	RLG(3)	○	○	○
	실리콘 가속도계(3)	○	○	○
센서 전자회로	센서제어기 보드	○	○	○
	MUX 보드	○	○	○
	자이로 인터페이스 보드	○	×	○
	가속도계 인터페이스 보드	○	×	○
항법 컴퓨터 & 통신 보드	항법컴퓨터 보드	○	○	×
	통신 보드	○	○	×
전원공급회로	저전압공급 보드	○	○	×
	고전압공급 보드	○	○	×
보조장치	GPS 수신기	○	○	×
	고도계	○	○	×

표 6. RAM 분석을 통한 레이저 관성항법장치 구성 장비별 고장확률.

Table 6. RAM analysis result according to LINS components.

레이저 관성항법장치 구성 장비		고장확률(%)
관성센서 조립체	RLG(3)	24.6
	실리콘 가속도계(3)	10.9
센서 전자회로	센서제어기 보드	1.7
	MUX 보드	1.2
	자이로 인터페이스 보드	6.5
	가속도계 인터페이스 보드	24.3
항법 컴퓨터 & 통신 보드	항법컴퓨터 보드	13.1
	통신 보드	3.9
전원공급회로	저전압공급 보드	1.6
	고전압공급 보드	9.5
기구부	관성센서 조립 마운트, 방진기	0.4
	하우징 및 커넥터	2.3

험, HILS, 항공기 탑재시험, 체계점검 및 체계종합시험을 통해서 고장검출 확률을 높이기 위한 최적 판단조건을 수립하고 이를 연속적으로 적용하여 지속적인 성능개선이 이루어졌다. 이러한 결과를 바탕으로 레이저 관성항법장치의 장기간 운용에서도 운용도중 발생된 모든 고장을 검출하여 관성항법장치 적용 체계의 신뢰도를 크게 향상시키는 결과를 얻었다.

표 6의 RAM (Reliability: 신뢰도, Availability: 가용도, Maintainability: 정비도) 분석결과를 근거로 레이저 관성항법장치 고장검출 기법의 고장검출 확률을 예측한 결과 레이저 관성항법장치 구성품 중 기구부를 제외한 모든 구성장비에 대한 고장검출이 가능하며, 이를 근거로 고장검출 확

률을 계산하면 약 97.3%가 된다. 본 논문에서 개발한 레이저 관성항법장치 고장검출 기법의 성능은 선진국에서 운용 중인 관성항법장치의 95% 고장검출 확률과 비교하여 동등 혹은 그 이상일 것으로 사료되며 이는 레이저 관성항법장치 체계 적용시 이의 신뢰도 향상에 크게 기여할 것으로 판단된다.

참고문헌

- [1] G. T. Schmidt and N. M. Barbour etc., "Advances in navigation sensors and integration technology," NATO, Report, EN-SET-064, 2003.
- [2] J. E. Killpatrick, "The laser gyro," *IEEE Spect.* vol. 4, no. 10, pp. 44-55, Oct. 1967.
- [3] E. J. Post, "Sagnac effect," *Review of Modern Physics*, vol. 39, no. 2, pp. 475-493, Apr. 1967.
- [4] H. S. Yoo and C. J. Kim, "Fault detection method of laser inertial navigation system using FFT," *J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*(in Korean), vol. 37, no. 5, pp. 502-510, 2009.
- [5] K. M. Shim and C. J. Kim, "A study on the dither random noise for improving the bias stability of ring laser gyroscope," *J. of Control, Automation and Systems Engineering*(in Korean), vol. 12, no. 11, Nov. 2006.
- [6] A. D. King, "Inertial navigation - forty years of evolution," *GEC Review*, vol. 13, no. 3, pp. 140-149, 1998.
- [7] MIL-STD-2165, "Testability Program for Electronic Systems and Equipments," 1985.
- [8] D. H. Titterton and J. L. Weston, *Strapdown Inertial Navigation Technology*, Peter Peregrinus Ltd., Lavenham, 1997.
- [9] G. M. Siouris, *Aerospace Avionics Systems*, Academic Press, Inc., 1993.
- [10] D. P. Payne, R. B. Shoaf, and P. Koesters, Development Test of the Honeywell Laser Inertial Navigation System(LINS), *ADTC-TR-75 -74*, 1975.
- [11] GEC-Marconi, *Operators Manual for the FIN3110 Airborne Demonstrator*, 1996.
- [12] Honeywell, *Technical Description of Tactical Advanced Land Inertial Navigator(TALINTM)*, 1995.
- [13] Thales Avionics, *Equipment Technical Specification, INS/GPS TOTEM3000*, 2005.
- [14] D. H. Hwang, S. K. Park, and M. S. Koo, "Attitude compensation of vision/DR integrated navigation system using gyroscope," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems* (in Korean), vol. 16, no. 8, pp. 804-809, Aug. 2010.
- [15] C. G. Park and J. K. Lim, "A scalar adaptive filter considering acceleration for navigation of UAV," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems* (in Korean), vol. 15, no. 1, pp. 31-36, Jan. 2009.

김 천 중

1991년 충남대 전자공학과 졸업. 1993년 동 대학원 석사. 1993년~2000년 국방과학연구소 연구원. 2001년~2002년 한국항공우주연구원 선임 연구원. 2003년~현재 국방과학연구소 선임연구원. 관심분야는 관성항법, 통합항법 및 필터이론 등.

유 기 정

1997년 아주대 제어계측공학과 졸업. 2002년 동 대학원 석사. 2002년~현재 국방과학연구소 선임연구원. 관심분야는 관성항법, 지형DB 대조항법 등.

김 현 석

2003년 한양대 전자공학과 졸업. 2005년 서울대학교 전기전자공학과 석사. 2005년~현재 국방과학연구소 선임연구원. 관심분야는 관성항법, 지형DB 대조항법 등.

유 준

1978년 서울대학교 전자공학과 졸업. 1980/1984년, KAIST 전기전자공학과 석사/박사. 1984년~현재 충남대학교 전자공학과 교수. 관심분야는 산업공정 제어, 센서 신호처리, IT 기반 로봇, 항법 시스템 등.