

생산 공정 효율화를 위한 다중 MEMS IMU 검사 체계 제안

이세호, 김동연, 임형섭, 김진성*, 한찬호

경북대학교, *엘아이지넥스원(주)

seho2131@knu.ac.kr

A Study on a Multi MEMS IMU Inspection System for Enhancing Production Efficiency

Seho Lee, Dongyeon Kim, Hyungseob Lim, Chanho Han, Jinseong Kim*

Kyungpook Nat. Univ., *LIGNEX1 Co., Ltd

요약

본 논문은 대한민국 유도무기 산업의 생산 효율성 향상과 품질 기준 충족을 위한 MEMS IMU(관성 측정 장치) 수락 검사 프로세스의 혁신적 개선 방안을 제안한다. 기존의 IMU 수락 검사는 모든 센서에 대해 정적 및 동적 시험을 전수로 수행하여 검사 시간이 길고 자원 소모가 많다는 단점이 있거나, LOT 단위로 표본을 추출해 전수 조사를 하지 못한다는 단점이 있었다. 이에 본 연구는 기존 검사 프로세스와 달리, 먼저 5초 이내의 데이터로 IMU 센서의 결함 여부를 신속하게 예측하여 선별하고, 결합으로 판정된 센서에 한하여 추가적인 정적 및 동적 시험을 수행하는 이중 단계 검사 체계를 제안하였다. 이를 위해 다수의 IMU 센서를 동시에 검사할 수 있는 실시간 스트리밍 기반의 시스템을 구축하고, 예측 모델의 정밀도를 강화하였다. 실험 결과 제안된 모델은 기존 모델 대비 RMSE를 약 30% 감소시켰으며, F1-score와 Recall 모두 1.0을 기록하여 결함 예측 정확도를 크게 향상시켰다. 본 연구의 성과는 유도무기의 생산 경쟁력 강화 및 수출 증대에 기여할 것으로 기대된다.

I. 서 론

1.1 연구 배경

대한민국 유도무기 산업은 수출 경쟁력 강화를 위해 생산 패러다임을 다 품종 소량 생산 체계에서 대량 생산 체계로 전환하고 있으며, 이에 따라 유도무기의 핵심 구성품인 MEMS IMU(관성 측정 장치)의 품질 관리 방식에 대한 혁신적인 변화가 요구되고 있다. MEMS IMU는 유도탄의 정밀도와 신뢰성을 결정하는 중요한 요소이며, 결함 제로(Zero-Defect) 품질 기준을 만족해야 한다. 특히, MEMS IMU 내의 자이로 센서는 유도탄의 회전 운동을 감지하여 안정적인 자세 제어에 필수적인 역할을 한다[1].

1.2 연구 필요성

기존의 MEMS IMU 수락 검사는 MEMS IMU 단품 단위의 정적 및 동적 시험에 의존하며, 장시간의 테스트를 요구하여 생산 효율성을 저해하고 증가하는 생산량에 대한 대응에 어려움을 겪고 있다. 다품종 소량 생산 체계에서는 이러한 장시간 시험으로 인해 샘플링 검사가 불가피하지만, 이는 유도탄 INS(관성 항법 장치) 성능 시험 중 불량 발생 시 분해 및 추가적인 인적 자원 투입이라는 문제점을 야기한다. 따라서, 생산성 향상과 품질 유지를 동시에 달성할 수 있는 새로운 검사 방법론의 개발이 시급하며, 특히 MEMS 자이로 센서의 효율적인 검사 방법이 요구된다.

1.3 연구 목표

본 연구는 MEMS IMU 수락 검사 패러다임의 전환을 목표로, 전수 점검을 수행하되 다량의 MEMS IMU를 동시에 점검하여 5초 이내에 스크리닝하고, 결함이라 판단된 대상에 대해 기존 MEMS IMU 수락 검사를 진행하는 새로운 검사 체계를 제안한다. 이를 위해, 1) 기존 연구의 모델을 개선하여 MEMS IMU 자이로 센서의 결함 예측 성능을 향상시키고, 2) 실시간 스트리밍 방식의 검사 시스템[3]을 구현함으로써 검사 효율성을 극대화한다.

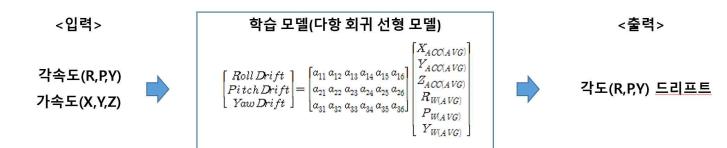
1.4 기존 연구와의 차별성

제안하는 방법론은 기존 연구의 모델을 개선하여 예측 정확도를 높이는 동시에, MEMS IMU 단품 단위의 점검을 넘어 유도탄 시스템 성능 예측에 활용하고, 실시간 스트리밍 검사 방식을 도입하여 검사 효율성을 극대화한다. 특히, 자이로 센서에 대한 실시간 스크리닝을 통해 IMU 수락 검사의 패러다임을 획기적으로 전환하고, 유도무기 생산 경쟁력 강화 및 수출 증대에 기여할 수 있다.

II. 본 론

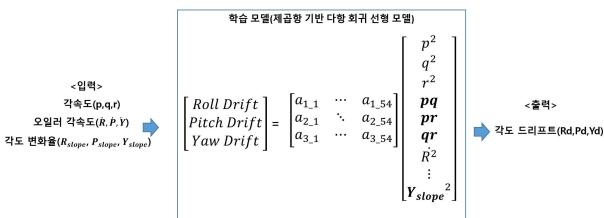
2.1 IMU 결합 예측 모델 개선

MEMS IMU는 유도탄의 자세 및 위치 정보를 제공하는 핵심 센서로서, 유도탄의 정확도와 신뢰성에 큰 영향을 미친다. 특히, MEMS IMU 내의 자이로 센서는 유도탄의 회전 운동을 감지하여 안정적인 자세 제어에 필수적인 역할을 한다. 따라서, MEMS IMU의 성능, 그 중에서도 자이로 센서의 성능은 유도탄의 전체적인 성능에 매우 중요한 요소이며, 본 연구에서는 이러한 MEMS IMU 자이로 센서의 성능을 정확하게 예측하고 불량 MEMS IMU를 효율적으로 선별하기 위한 모델 개선 방안을 제시한다.



[그림 1] 기존 연구에서 제안한 학습 모델[2]

기존 연구[2]에서는 [그림 1]과 같이 IMU 각속도, 가속도 평균값 정보를 바탕으로 INS 자세 드리프트를 예측하는 모델을 제안하였으나, 제안된 모델은 Precision은 높으나 Recall이 낮아 생산 효율성 향상을 위해 개선이 필요하다.

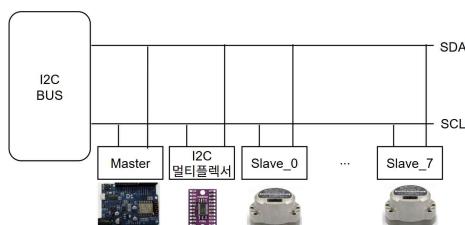


[그림 2] 본 논문에서 제안하는 학습 모델

이에, 본 연구에서는 기존 연구의 다항 회귀 기반 접근 방식을 유지하되, 특히 현장에서 IMU 센서 데이터를 이용하여 INS 자체 정보를 계산할 수 있는 상황을 고려하여, [그림 2]와 같이 각속도, 오일러 각 변화율, 단기 누적 드리프트 평균 등 Drift와 높은 상관성을 보이는 지표들을 추가적으로 산출하고, 이를 바탕으로 2차 다항 회귀 모델을 적용하여 비선형 상호작용 항을 포함함으로써 모델의 예측 정밀도를 강화하였다. 제안 모델의 학습 및 검증에는 불량 검출을 위해 수집한 MEMS IMU 데이터 314종(불량 129종, 정상 185종)을 활용하였다. 모델 성능 평가를 위해 RMSE, F1-score, Recall 등의 지표를 사용하고, 기존 모델과의 비교 분석을 통해 개선된 성능을 입증하였다.

2.2 실시간 스트리밍 기반 IMU 검사 시스템 구축

본 연구에서는 다수의 MEMS IMU로부터 데이터를 병렬로 수집하고, 고성능 컴퓨팅 환경에서 실시간으로 처리하여 MEMS IMU의 결함을 신속하게 판정할 수 있는 시스템 구조를 제안한다. 이를 위해, [그림 3]과 같이 I2C 버스(Inter-Integrated Circuit Bus) 개념을 기반으로 시스템을 설계하고, 다수의 MEMS IMU를 I2C 멀티플렉서에 연결하여 데이터를 효율적으로 수집하는 방안을 고려하였다. 멀티플렉서를 사용하면, 마이크로 컨트롤러와 같은 하나의 마스터 장치가 여러 슬레이브 장치(IMU 센서)와 통신하여 데이터를 효율적으로 수집할 수 있다. 이는 각 IMU 센서로부터 개별적으로 데이터를 획득하는 방식에 비해 하드웨어 자원을 절약하고 데이터 처리 속도를 향상시킬 수 있게 된다.



[그림 3] I2C 버스 기반 MEMS IMU 검사 시스템 개요

이후, 다수 MEMS IMU에서 획득한 5초의 데이터에 대해 2.1에서 개발한 개선된 자이로 센서 예측 모델을 적용하여 결함을 신속하게 판단한다.

또한, 검사 결과를 실시간으로 시각화하여 작업자가 MEMS IMU 상태를 직관적으로 파악하고, 이상 징후를 조기에 감지할 수 있도록 지원하는 인터페이스를 개발하였다.

2.3 실험 결과 및 분석

2.3.1 IMU 결합 예측 모델 성능 분석

제안하는 MEMS IMU 자이로 센서 결합 예측 모델의 성능을 검증하기 위해, 기존 모델과 동일한 데이터셋(MEMS IMU 데이터 314종)을 사용하여 비교 실험을 수행하였다. 모델 성능은 RMSE, F1-score, Recall 지표를 사용하여 평가하였으며, 그 결과, 제안 모델이 기존 모델 대비 우수한 성능을 나타내는 것을 확인하였다.

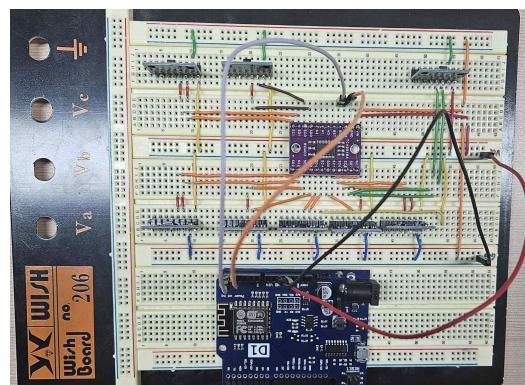
[표 1] 기존 모델과 제안 모델 성능 비교

모델	RMSE	F1-score	Precision	Recall
기존 모델	0.064	0.97	1.0	0.94
제안 모델	0.043	1.0	1.0	1.0

특히, RMSE는 0.043으로 기존 모델(0.064) 대비 약 30% 감소하여 예측 정확도가 크게 향상되었음을 확인하였다. F1-score와 Recall 역시 각각 1.0으로 기존 모델 대비 5% 이상 향상된 성능을 보였으며 결합 제로(Zero-Defect) 품질 기준을 만족하였다.

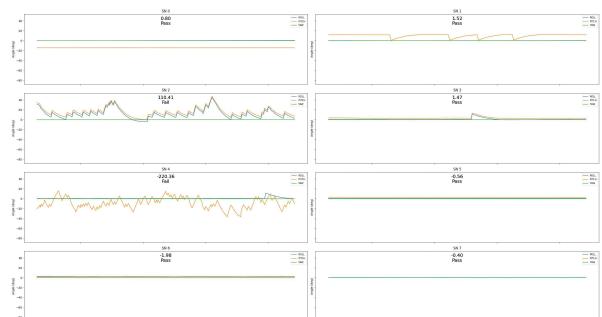
2.3.2 실시간 스트리밍 기반 IMU 검사 시스템 적용 가능성 확인

아두이노와 MPU6050 계열의 IMU 센서를 활용한 실험 환경을 구축하여 [그림 4]와 같은 하드웨어 구성을 통해 다수의 IMU로부터 실시간 스트리밍 데이터를 수집하고, 스크리닝 시스템의 적용 가능성을 확인하였다.



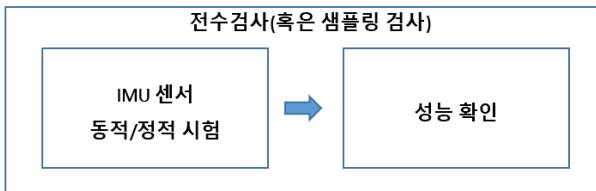
[그림 4] 아두이노 및 I2C 멀티플렉서 연결 구성

[그림 5]와 같이 검사 결과를 실시간으로 시각화하여 작업자가 MEMS IMU 상태를 직관적으로 파악할 수 있도록 GUI를 구현하였다.

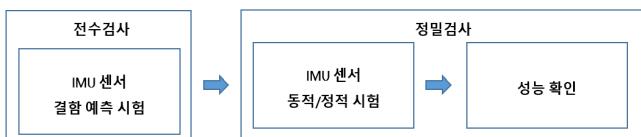


[그림 5] 아두이노 기반 MEMS IMU 실시간 스트리밍 검사 시스템

2.4 유도탄 IMU 수락 검사 프로세스 제안



[그림 6] 기존 유도탄 IMU 수락 검사 프로세스



[그림 7] 본 연구에서 제안하는 유도탄 IMU 수락 검사 프로세스

기존 IMU 수락 검사는 모든 센서에 대해 정적 및 동적 시험을 전수로 수행하는 방식으로, 시간과 자원 소모가 크고 생산량 증가에 대응하기 어렵다. 본 연구에서는 5초 이내의 센서 데이터를 기반으로 다수의 MEMS IMU 결합 여부를 신속하게 예측하여 스크리닝 하고, 이후 결합으로 판단되는 센서에 한해 정적 및 동적 시험을 수행하는 이중 단계 검사 체계를 제안한다. [그림 6]은 기존 검사 프로세스(전수 정적/동적 시험 기반)을 나타내고, [그림 7]은 제안된 검사 프로세스(예측 기반 스크리닝 후 선별 시험)를 비교하여 나타낸다. 제안된 방식은 생산성 향상뿐 아니라 품질 기준 유지 측면에서도 효과적인 접근법으로 평가된다.

III. 결론

본 논문에서 제안하는 유도탄 수락 검사 프로세스를 공정에 적용할 경우 IMU 수락 검사의 패러다임을 획기적으로 전환하고, 유도무기 생산 경쟁력 강화 및 수출 증대 효과를 기대할 수 있다.

ACKNOWLEDGMENT

본 논문은 「지역혁신중심 대학지원체계(RISE)」 ICT-ABB 사업단의 지원을 받아 작성되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] Barbour, Neil M. "Inertial navigation sensors." NATO RTO Lecture Series, RTO-EN-SET-116, Low-Cost Navigation Sensors and Integration Technology (2010): 1-24.
- [2] Lee, H. D., & Kim, J. S. (2024). Detection of Assembled IMU Drift Defect Using Multinomial Regression. KNST 2024 Winter Conference, 594 - 596.
- [3] 조진희, 진재현. MEMS IMU 센서의 다중화와 개별 센서의 오동작 검출. 항공우주시스템공학회 학술행사 논문집, 33 - 35