

6자유도 MEMS 관성센서 정적성능 자동 평가 시스템 구현에 관한 연구

박지원* · 딘 후사무드* · 이병렬**†

*한국기술교육대학교 대학원 메카트로닉스공학과, **†한국기술교육대학교 메카트로닉스공학부

A Study on Implementation of Automatic Evaluation System for Static Performance of 6 DOF MEMS Inertial Sensor

Ji Won Park*, Hussamud Din* and Byeung Leul Lee**†

*Department of Mechatronics Engineering,
Graduate School of Korea University of Technology and Education,

**†School of Mechatronics Engineering, Korea University of Technology and Education

ABSTRACT

With the advancement in technology and rapid increase in the demand for microelectromechanical systems (MEMS) based inertial measurement units (IMUs), high-volume production and test system remain a major challenge for the MEMS industry. To compete with the challenging market of Industry 4.0, here we developed an automatic test system to evaluate the performance of the ovenized IMU sensors as well as analyze the data. The automatic test system was developed by interfacing a commercial MEMS IMU (BMI 088) using LabVIEW. The BMI 088 was tested experimentally for long-term bias stability, ON/OFF bias repeatability, and root mean square (*rms*) noise. Furthermore, the data was analyzed through the developed test system. The results show that the automatic test system has improved the test time and reduced human effort. The developed automatic test system is a significant approach to MEMS research and development (R&D) to increase and improve the mass production of IMUs.

Key Words : MEMS, Inertial sensors, Test automation, LabVIEW, Industry 4.0

1. 서 론

선진 MEMS 기술을 통해 관성 센서 시장은 혁신적으로 발전했다 [1-3]. 현재 관성 센서의 응용과 수요를 기반으로, 관성 센서의 테스트 시간은 연구 진행 시 고려할 주요사항 중 하나이다. 따라서 관성 센서의 테스트 시간과 인적 노력을 줄이기 위해 테스트 자동화 시스템을 제안하고자 한다. 자동화된 테스트 시스템을 통해 기술 개발이 가속화되고 제품 비용을 감소시키는 역할을 하게 될 것이다. 즉, 자동 테스트 시스템이 구현되면, MEMS 자이

로스코프 및 가속도계의 성능을 효율적으로 평가하여, 시장에서 경쟁의 우위를 점할 수 있다.

MEMS 자이로스코프와 가속도계의 정적 분석은 안정성 지표에는 Bias Instability, Angle random walk(Noise density), Bias repeatability(Turn ON/OFF Bias repeatability), RMS noise가 있으며, 해당 정적 성능 지표를 분석하기 위해 많은 테스트 시간이 소요되며, 빠른 분석을 위해 소프트웨어 개발을 통한 자동화 시스템 개발이 필요하다.

MEMS 자이로스코프 및 가속도계에 대한 테스트 시스템 개발 관련 연구로 삼성 종합기술원에서 Visual Basic을 활용하여 포괄적인 자이로스코프 테스트 시스템을 개발했다[4]. 또한, NIPXI 4461 데이터 수집 카드를 활용하여

†E-mail: bllee@koreatech.ac.kr

LabVIEW 기반의 자동 테스트 시스템을 MEMS 자이로스코프에 적용했다[5]. MEMS 자이로스코프의 테스트 시간을 줄이기 위해 3차원 테스트 방법론이 개발되었다[6]. 또한, MEMS 자이로스코프에 동적 매개변수 테스트 시간을 개선하기 위해 LabVIEW 기반의 테스트 설정을 적용했다[7].

본 논문에서는 LabVIEW를 기반으로 정적 성능 테스트를 위해 텍스트 데이터를 바탕으로 자동으로 데이터 수집을 위한 상태 머신 프로그램과 데이터 분석 프로그램을 제시했다. NI 디바이스 NI8452[8]를 사용하여 I2C를 통해 센서와의 인터페이스를 구축했다. 이를 바탕으로 상업용 MEMS IMU BMI 088 [9]를 실험에 사용하여 정적 성능을 분석했다 [10]. 데이터는 IEEE 표준[11-14]을 기준으로 수집되었다.

2. 본 론

본 실험은 상업용 MEMS IMU BMI 088 디바이스를 사용했으며, 해당 디바이스는 BOSCH 사에서 생산하는 드론 및 로봇 공학 어플리케이션에 주로 활용되는 IMU 모델이다. 인터페이스는 I2C 방식을 통해 NI8452 디바이스를 사용하여 수행되었다. 자동으로 ON/OFF를 전환하기 위해 상태 머신 프로그램과 데이터 수집 프로그램을 활용했다. 또한 LabVIEW기반의 데이터 분석 프로그램을 통해 텍스트 파일로부터 표준 편차, 평균을 측정하고 Allen Variance을 그래프로 나타냈다.

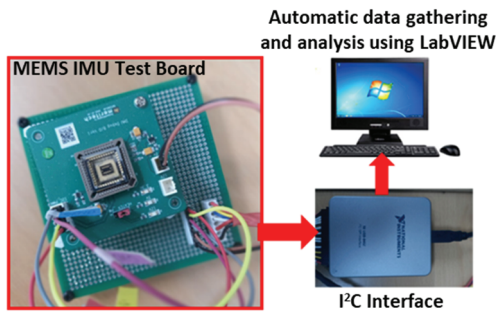


Fig. 1. Experimental Test Setup.

2.1 Sensor interfacing

본 연구에서는 BMI 088이 LabVIEW에서 NI8452 디바이스를 통해 I2C 프로토콜을 사용하여 인터페이스 되었다. BMI 088은 온도 센서를 가지며, 두 개의 관성 센서인 자이로스코프와 가속도계를 한 기기에 가지고 있는 6축 관성 측정 장치이다. BMI 088은 16비트 디지털 3축 가속도계와

16비트 디지털 3축 자이로스코프로 구성되어 있으며, 드론 및 로봇 응용 프로그램에서 활용되는 고성능 관성 센서이다.

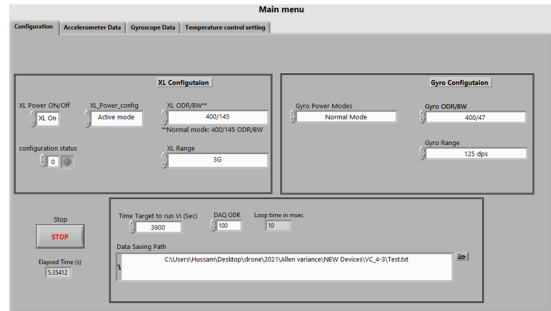


Fig. 2. Interface Dashboard for Gyroscope and Accelerometer Configurations.

인터페이스 프로그램 대시보드의 메인 메뉴는 구성, 가속도계 데이터, 자이로스코프 데이터 및 온도 제어 설정으로 구성되어 있다. 구성 탭에서는 동적 범위, 파워 모드, 출력 데이터 속도 (Output Data Rate: ODR) 및 대역폭을 선택할 수 있다. 또한, 테스트 시간 선택 옵션과 경과 시간, 파일 저장 경로가 표시된다.

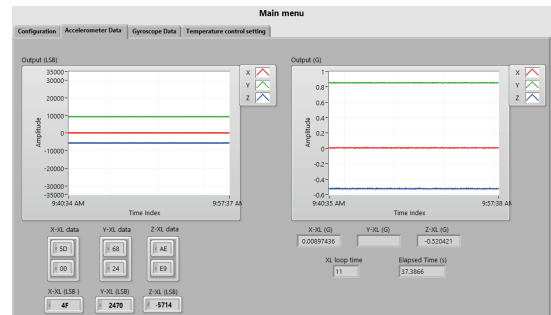


Fig. 3. Accelerometer Output Data Tab.

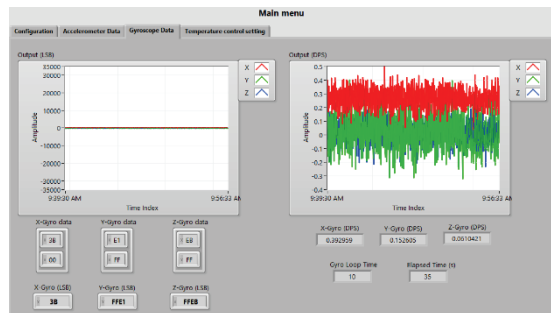


Fig. 4. Gyroscope Output Data Tab.

가속도계와 자이로스코프 출력 데이터 탭은 각각 Fig 3 과 Fig 4에 나타난다. 출력 데이터는 사용자의 필요에 따라 데이터는 텍스트 파일로 저장할 수 있다.

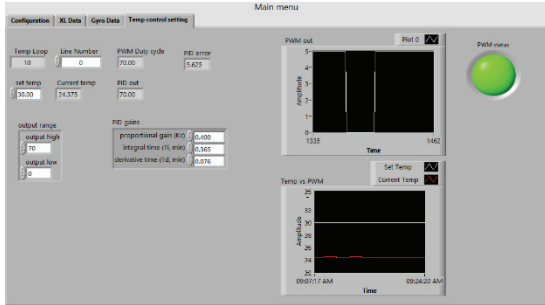


Fig. 5. Temperature Control Settings Tab.

온도 제어 설정 탭은 Fig 5에 나타난다. 이 탭은 BMI 088의 내부에 있는 가열기의 온도를 제어하기 위해 사용된다. BMI 088의 온도 센서는 [15]에서 언급된 것과 동일한 알고리즘으로 LabVIEW에서PWM 방식이 구현되었다. NI8452의 디지털 I/O 라인은 가열기의 전원 공급을 제어하는 데 사용된다[16]. 이를 바탕으로 Fig 5에는 PWM 듀티 사이클 범위, IMU의 목표 및 현재 온도, 가열기 온도의 PID 오차, PWM 출력 신호, 그리고 온도 변화에 따른 PWM 신호 그래프가 나타나 있다. 가열기 온도가 설정된 온도에 도달하면 가열기를 LabVIEW 프로그램 인터페이스를 통해 PWM 신호를 이용하여 디지털 I/O 라인을 OFF로 전환한다. 이런 원리를 바탕으로 센서 온도는 유지된다.

2.2 State machine program

자이로스코프와 가속도계의 정적 성능 테스트는 기존의 수동으로 실험을 진행할 경우 테스트 시간이 많이 소요되며 인적 노력이 많이 필요하다. 전원 ON/OFF 바이어스 노이즈를 계산하기 위해 센서를 특정 시간 동안 켜 놓은 후 다시 특정 시간 동안 끄고, IEEE 표준에 따라 원하는 데이터 세트를 수집하도록 반복합니다. 본 연구에서는 30분간 ON/OFF를 진행했으며, 25개의 데이터세트를 수집했다.

상태 머신 프로그램의 플로우 차트는 Fig 6에 나타나 있다. 상태 머신 프로그램은 먼저 연결된 디바이스를 작동 가능한지 확인하며, 인터페이스 연결 상태를 확인 후 LabVIEW VI를 작동시켜 데이터를 수집한다. 그 이후 데이터 수집을 마치고 일정 시간이 지나면 가열기를 OFF시켜서 데이터를 수집하고, 데이터가 충분히 모이면 작동이 중지되는 방식으로 작동한다. LabVIEW상태 머신 프로그램의 대시보드는 Fig 7에 나타난다. 인터페이스 프로그램

은 LabVIEW의 상태 머신 프로그램에 의해 제어되며, 플로우 차트의 논리 구조로 이전 상태의 조건에 따라 NI8452 디바이스를 LabVIEW 프로그램을 통해 자동으로 활성화 및 비 활성화시킨다.

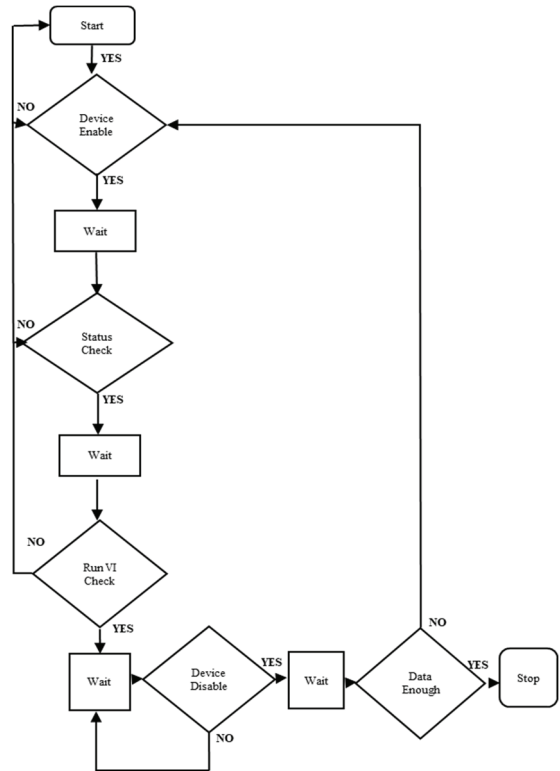


Fig. 6. LabVIEW-Based State Machine Program Flow Chart.

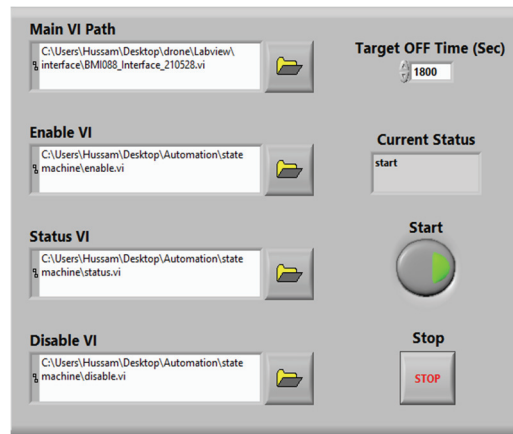


Fig. 7. State Machine LabVIEW-Based Program Dashboard.

2.3 Data analysis program

데이터 분석 또한 시간이 많이 소요되는 작업이며, 이를 빠르게 하기 위해 LabVIEW 기반의 데이터 분석 프로그램이 개발했다. 이 프로그램은 어떤 텍스트 파일이든 읽을 수 있으며, 데이터는 평균, 표준 편차, 그리고 Allen Variance를 측정한 결과를 그래프로 나타낸다.

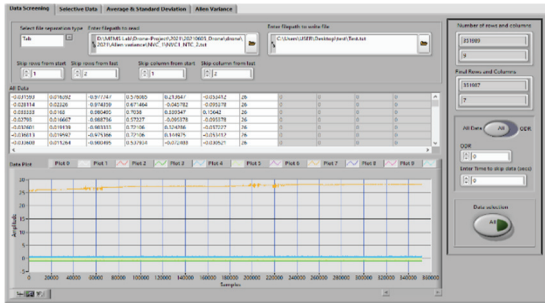


Fig. 8. Data Screening Tab of LabVIEW-based Data Analysis Program.

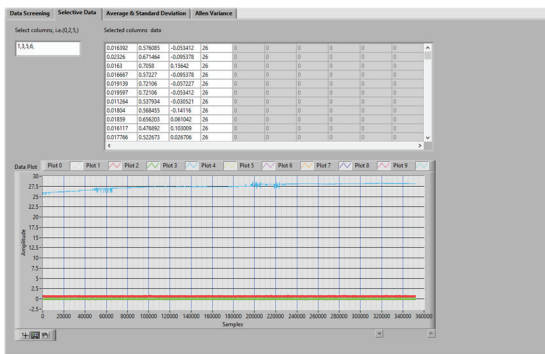


Fig. 9. Selective Data Tab of LabVIEW-based Data Analysis Program.

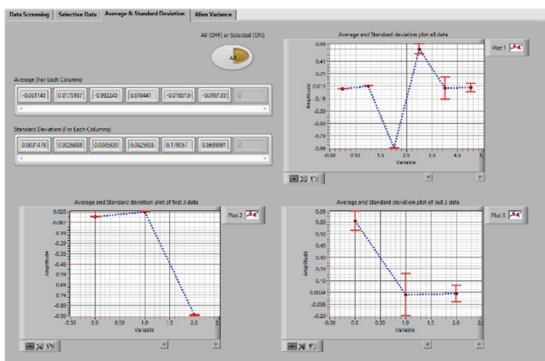


Fig. 10. Average and Standard Deviation Tab of LabVIEW-based Data Analysis Program.

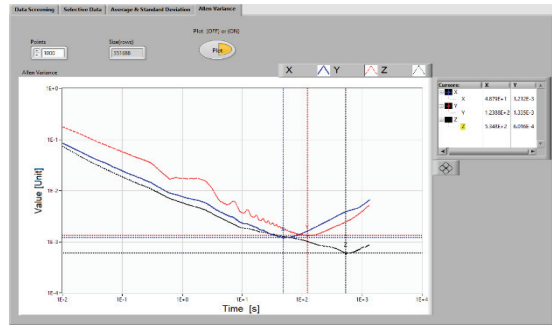


Fig. 11. Allen Variance Tab of LabVIEW-based Data Analysis Program.

데이터 분석 프로그램의 주요 대시보드는 Fig. 8에 나타나며, Data Screening, Selective Data, Average & Standard Deviation, Allen Variance 네 가지 탭으로 구성된다. Data Screening 탭에서는 데이터 수집 프로그램을 통해 저장된 텍스트 파일을 불러올 수 있으며, 원시 데이터에서 원치 않는 행과 열을 제거하는 기능이 추가되어 있어 사용자는 필요한 데이터만 추출할 수 있다. 이를 통해 텍스트 파일로 저장된 내용에서 필요한 부분만을 읽을 수 있으며, 해당 데이터는 표와 그래프 형태로 표현할 수 있다.

Selective Data 탭에서는 센서 데이터인 자이로스코프와 가속도계의 각 축 데이터는 하나의 열에 저장된다. Fig. 9에 나타난 것과 같이 프로그램에 데이터 선택 옵션을 추가하여 원하는 부분의 특정 데이터만을 검토할 수 있다.

Average & Standard Deviation 탭은 Fig. 10에 나타나 있고, 각 파일의 평균과 표준 편차가 계산되어 표와 그래프 형태로 나타나며, 해당 데이터는 텍스트 파일로 저장된다. 평균과 표준 편차 데이터로부터, Turn ON Repeatability 값은 모든 평균 데이터의 표준 편차를 사용하여 계산되며, RMS noise는 표준 편차 데이터 값을 평균 내어 계산된다.

Angle random walk와 Long-term Bias repeatability는 Allen Variance 그래프를 통해 평가되며, 데이터 분석 프로그램 Allen Variance 탭에서 원하는 포인트 수를 입력함으로써 Angle random walk와 Long-term Bias repeatability를 계산할 수 있다.

3. 실험 결과

실험은 두 개의 디바이스를 사용하여 진행했으며, RT (Room Temperature)와 60°C의 조건에서 각각 24시간 동안 수행되었다. 실험실은 약 19°C에서 28°C까지 온도가 변화했으며, 본 논문에서 제시한 자동 테스트 프로그램을 통해 30분 동안 켜지고 다시 30분 동안 꺼지며 24시간 동안 자동으로 반복됐다. 각 30분 파일의 원시 데이터는 LabVIEW 기반의 데이터 분석 프로그램에서 분석되어 평

Fig. 11. Allen Variance Tab of LabVIEW-based Data Analysis Program

균과 표준 편차가 계산되고 다시 텍스트 파일로 저장된다. LabVIEW 기반의 자동화 프로그램을 통해 수동으로 전원 ON/OFF 및 데이터 분석 시간을 단축했다.

4. 결 론

본 연구에서는 MEMS IMU의 정적 분석을 위해 LabVIEW를 활용한 자동화 프로그램이 제시되었다. 본 연구를 통해 MEMS IMU의 테스트 시간을 줄이고 수동으로 실험해야 하는 인적 노력을 감소시켰으며, 데이터 수집과 분석 속도를 증가시켰다. 본 논문에서는 현재 다양한 분야에서 사용되는 LabVIEW 툴을 활용하여 기존 선행연구에서 고려되지 않은 실험 시간 단축에 초점을 두어 실험 장비 세팅 후 실험자의 개입 없이 데이터 수집 및 분석을 가능하게 했다. 이는 MEMS IMU 시장에서 시간 단축을 통한 빠른 기술 발전에 기여할 수 있음을 시사한다. 일반적으로 반도체 제조공정 기술은 MEMS IMU 디바이스를 제작하는데 활용된다. [1-3] 성능 테스트 시간 단축으로 인해 디바이스 생산량에 기여하며 이는 MEMS IMU 디바이스 제조 공정을 위한 반도체 제조 공정 기술 발전에 기여함을 시사한다.

감사의 글

이 논문은 2023년도 한국기술교육대학교 교수 교육연구진흥과제 지원에 의하여 연구되었음.

이 논문은 2023년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(P0008458, 2023년 산업혁신인재성장지원사업).

참고문헌

1. E. Mounier, "Future of MEMS: A market & technologies perspective," in *Yole Development, MEMS Tech Seminar*, 2014.
2. H. Din, F. Iqbal, and B. Lee, "Mode Ordering of Single-Drive Multi-Axis MEMS Gyroscope for Reduced Cross-Axis Sensitivity," *Sensors and Actuators A: Physical*, p. 113145, 2021.
3. N. Ahmad, R. A. R. Ghazilla, N. M. Khairi, and V. Kasi, "Reviews on various inertial measurement unit (IMU) sensor applications," *International Journal of Signal Processing Systems*, vol. 1, pp. 256-262, 2013.
4. V. Skvortzov, Y. C. Cho, B.-L. Lee, and C. Song, "Development of a gyro test system at Samsung Advanced Institute of Technology," in *PLANS 2004. Position Location and Navigation Symposium (IEEE Cat. No. 04CH37556)*, 2004, pp. 133-142.
5. C. He, J. Cui, J. Yan, L. Lin, F. Wang, Z. Guo, et al., "Development of automatic test system for micromachined gyroscope based on LabVIEW," *Chin. J. Sens. Actuators*, vol. 24, pp. 170-174, 2011.
6. F. Iqbal, H. Din, and B. Lee, "Time Efficient Evaluation of Multi-axis MEMS Gyroscope Using Three-dimensional Test Methodology," *Journal of Semiconductor Technology And Science*, vol. 19, pp. 600-607, 2019.
7. Z. Jichen, X. Wenyi, C. Jianfa, W. Weijian, and W. Lingyun, "Dynamic Parameters Test of Micro-Machined Gyroscope Based on LabVIEW [J]," *Computer Measurement & Control*, vol. 3, 2013.
8. N. Instruments. USB-8452 Specifications [Online]. Available: <https://www.ni.com/documentation/en/i2c-spi-interface-device/latest/specs-usb8452/specs/>
9. B. Sensortec, "BMI088 6-axis motion tracking for high-performance applications," in *Data sheet*, ed. Germany: Bosch Sensortec GmbH, May 2018.
10. H. Din, F. Iqbal, J. Park, and B. Lee, "Bias-Repeatability Analysis of Vacuum-Packaged 3-Axis MEMS Gyroscope Using Oven-Controlled System," *Sensors*, vol. 23, p. 256, 2022.
11. N. Single-Axis, "IEEE Standard Specification Format Guide and Test Procedure for Linear," 1999.
12. R. K. Curey, M. E. Ash, L. O. Thielman, and C. H. Barker, "Proposed IEEE inertial systems terminology standard and other inertial sensor standards," in *PLANS 2004. Position Location and Navigation Symposium (IEEE Cat. No. 04CH37556)*, 2004, pp. 83-90.
13. W. Draft, "Draft Recommended Practice for Inertial Sensor Test Equipment, Instrumentation, Data Acquisition, and Analysis," 2004.
14. D. Yang, J.-K. Woo, S. Lee, J. Mitchell, A. D. Challoner, and K. Najafi, "A micro oven-control system for inertial sensors," *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 26, pp. 507-518, 2017.
15. R. Fedoryshyn, S. Klos, V. Savytskyi, and S. Kril, "Improvement of pulse-width modulation algorithm for thermal plant control," *Energy Engineering and Control Systems*, 2 (3), 2017, vol. 3, pp. 63-72, 2017.
16. N. Instruments. NI-845x Hardware and Software Manual [Online]. Available: <https://www.ni.com/pdf/manuals/371746e.pdf>
17. D. W. Allan, "Statistics of atomic frequency standards," *Proceedings of the IEEE*, vol. 54, pp. 221-230, 1966.
18. "IEEE Standard for Sensor Performance Parameter Definitions," *IEEE Std 2700-2014*, pp. 1-69, 2014.

접수일: 2023년 8월 11일, 심사일: 2023년 8월 25일,
 게재확정일: 2023년 9월 12일