https://doi.org/10.7735/ksmte.2025.34.2.81

J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng.
ISSN 2508-5107(Online)

Check for updates

IMU 데이터를 활용한 이동 정확도 및 정밀도 분석

김준영[a], 장선호[a], 이은상[a,*]

Analysis of Movement Accuracy and Precision Using IMU Data

Junyoung Kim[a], Sunho Chang[a], Eunsang Lee[a,*]

[a] Department of Mechanical Engineering, Inha University

ARTICLE INFO

Article history:
Received 21 January 2025
Revised 7 February 2025
Accepted 11 February 2025

Keywords:
IMU (inertial measurement unit)
MATLAB
Data visualization
Manufacturing process monitoring
6DOF analysis

ABSTRACT

Accurate movement measurement is essential in precision manufacturing to ensure high-quality production. This study presents an IMU-based system for evaluating movement accuracy and precision in CNC-based electrochemical machining. The system employs an IMU sensor attached to the moving electrode to measure displacement along the X and Y axes, verifying whether the commanded travel distance (e.g., 1 mm) matches the actual movement. Unlike traditional monitoring methods that rely on indirect sensor-based measurements requiring mechanical error compensation, this approach directly analyzes movement accuracy using real-time IMU data. To achieve this, displacement data from the IMU is collected and processed in MATLAB, where filtering and noise reduction techniques enhance measurement reliability. Experimental validation demonstrates the system's ability to detect small-scale motion deviations, offering a quantitative assessment of movement errors. The proposed method provides a practical solution for real-time displacement verification in high-precision machining, contributing to improved process efficiency and quality control.

1. 서 론

정밀 제조 공정은 현대 산업에서 품질 관리와 생산성 향상의 핵심 과제로 부각되고 있다. 특히 제조 공정에서 발생하는 미세한 오차는 제품 품질에 직접적으로 영향을 미치며, 이를 조기에 감지하고 교정할 수 있는 기술의 필요성이 커지고 있다. 기존의 공정 모니터링 방법은 물리적 한계와 분석 속도에서 제약이 있어, 고속성과 정밀도를 동시에 만족시키는 새로운 접근 방식이 요구되고 있다. 본 연구는 관성측정장치(inertial measurement unit, IMU)를 활용한 제조 공정 모니터링 시스템이다. IMU는 가속도계와 자이로스코프를 결합한 장치로, 병진 및 회전 데이터를 실시간으로 측정할 수 있다. 특히, IMU를 통해 측정할 수 있는 움직임은 6자유도(6 degrees of freedom, 6DOF)로 정의되며, 이는 3축 방향(x, y, z)으로의 병진 운동과 3축 회전(roll, pitch, yaw) 운동을 포함한다. 6DOF 분석을 통해 제조 공정에서 발생하는 미세한 변화를 정밀하게 감지할 수 있으며, 실시간으로 분석해서 공정 이상을 조기에 탐지할 수 있다. 본 연구는 MATLAB 기반 데이터 분석 및 시각화 기술을 적용해 IMU 데이터를 처리하고 제조 공정에서 발생하는 이상 상태를 실시간으로 감지할 수 있는 알고리즘을 개발한다. IMU 데이터를 처리하고 노이즈를 제거하기 위한 데이터 전처리 방식을 설계하며, IMU 데이터를 통합하여 6DOF 분석을 수행함으로써 병진 및 회전 동작을 입체적으로 시각화한다. 또한,

* Corresponding author. Tel.: +82-32-860-7308
E-mail address: leees@inha.ac.kr (Eunsang Lee).

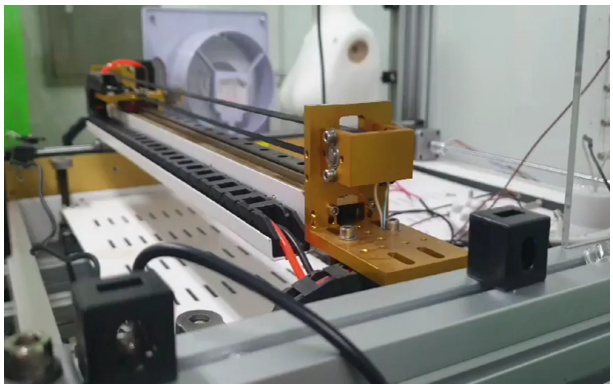


Fig. 1 Key operational points of the machine (X, Y)

Fig. 2 NGIMU (x-io Technologies, UK)

제안된 시스템의 성능을 제조 공정에서 검증하고, 이를 통해 공정 이상 상태를 탐지할 수 있는 가능성을 평가한다. 본 연구를 통해 제조 공정의 품질 관리 및 생산성을 향상시키는 데 기여할 것으로 기대된다[1-4].

2. 실 험

2.1 실험 설계 및 데이터 수집

본 연구는 Mendel Type의 이동식 전기화학 공정을 위한 CNC 장비(Fig. 1)를 활용하여 실험했고, IMU 센서를 X, Y 축을 따라 이동하는 가공부에 부착하여 데이터를 측정했다.

본 시스템은 X, Y 축을 따라 직선 이동하며, 실험의 핵심 목표는 명령된 이동 거리(예: 1 mm 이동)와 IMU를 통해 측정된 이동 거리 간의 정확도를 검증하는 것이다. 기존의 제조 공정 모니터링은 주로 센서를 활용한 간접 측정 방식에 의존하며, 기계적 오차 보정이 필요하다. 그러나 본 연구는 IMU를 이용해서 이동 거리를 측정하고 검증하는 방식이다. 이를 위해 X, Y 축 방향의 이동 데이터를 측정하고 분석하며, 실험 장비의 이동 과정에서 발생할 수 있는 오차를 평가한다.

실험 장비는 X, Y 축을 따라 정확한 병진 운동을 수행하도록 설계되었으며, 측정된 데이터는 MATLAB을 활용하여 분석 및 시각화된다. 본 연구는 이러한 측정 시스템을 통해 정밀 가공 공정에서의 이동 정확성을 평가하는 것이 목표이다.

본 연구는 NGIMU(next generation IMU) 장치(x-io Technologies, UK)(Fig. 2)를 활용했다. NGIMU는 고성능 관성 측정 장치로, 3축 가속도계와 ±2000 °/s 범위의 3축 자이로스코프가 결합된 6축 센서를 탑재하고 있다. 이 장치는 UDP(user datagram protocol) 통신을 통해 데이터를 실시간으로 전송(Table 1)할 수 있다.

Table 1 UDP communication setup

```
% Create a UDP object
udpObj = udp('192.168.1.1', 9000); % IP address and port
fopen(udpObj); % Start UDP communication
```

```
% Transmit and receive data
fwrite(udpObj, 'Start'); % Send the 'Start' command
data = fread(udpObj); % Receive data
fclose(udpObj); % End UDP communication
```

Table 2 Data transmission speed comparison

Sampling rate	Data transmission speed (kbps)	Data loss
50 Hz	250	None

Table 3 Sampling rate setup

```
% Set the sampling rate
fs = 50; % Sampling frequency (Hz)
t = 0:1/fs:10; % Generate time vector for 10 seconds
```

2.1.1 데이터 측정 속도 설정

데이터 측정 속도는 제조 공정의 특성과 센서의 반응성을 종합적으로 고려해 50 Hz로 설정(Table 2)했다. 이는 Nyquist-Shannon 샘플링 정리에 따라, 관심 주파수 대역(일반적인 제조 공정에서는 25Hz 미만)의 두 배로 설정했다. 50 Hz의 샘플링 주파수는 초당 50개의 데이터 포인트(Table 3)를 제공해 대부분의 제조 공정에서 발생하는 급격한 변화나 미세한 움직임을 포착(Fig. 3)할 수 있다[5]. 이는 Wi-Fi를 통한 UDP 통신에서 안정적인 실시간 데이터 전송을 보장하면서 네트워크 부하를 최소화할 수 있는 적절한 속도로 확인됐다. 또한, NGIMU 장치의 배터리 수명을 고려할 때도, 50 Hz의 측정 속도는 장시간 연속 측정이 가능하다.

2.1.2 Wi-Fi를 활용한 실시간 데이터 측정

NGIMU는 내장된 Wi-Fi를 통해 실시간으로 데이터에 접근할 수 있게 AP(access point) 모드로 설정했다[6]. 설정은 XIO

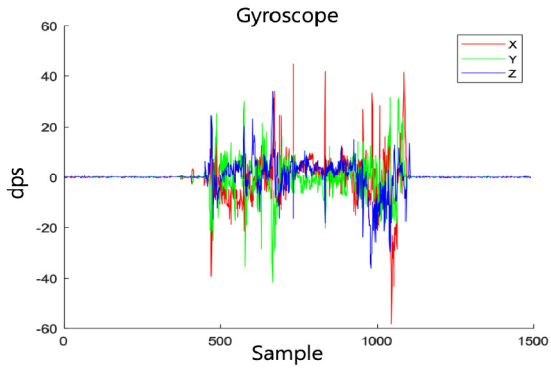
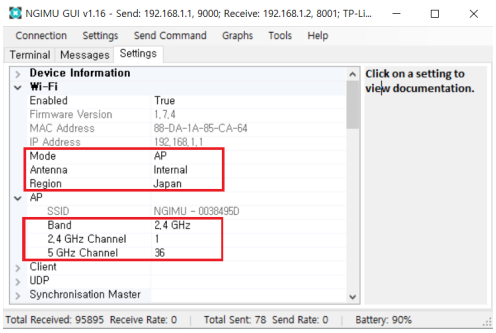
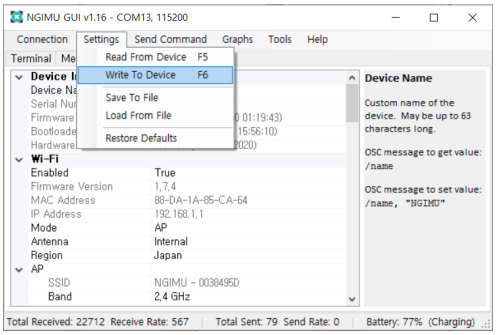


Fig. 3 Data collection process output



(a) Value set



(b) Upload set

Fig. 4 Wi-Fi AP mode and configuration

Table 4 Wi-Fi configuration

Setting	Value
Band	2.4 GHz, 5 GHz
Channel	Channels 1-11
Security	WPA2 encryption

Technologies사에서 제공하는 GUI를 사용(Fig. 4)했다. AP 모드 설정 시 주의할 점으로는 Band 선택(2.4 GHz와 5 GHz 중 선택), Channel 설정(간섭을 최소화하기 위해 주변 Wi-Fi 환경 고려), 그리고 Security 설정(데이터 보안을 위해 WPA2 암호화 사용)(Table 4) 등이 있다.

UDP 프로토콜을 통한 데이터 전송은 MATLAB 환경에서 구현(Fig. 5, Table 5)했다. UDP는 연결 지향적이지 않은 프로토콜로,

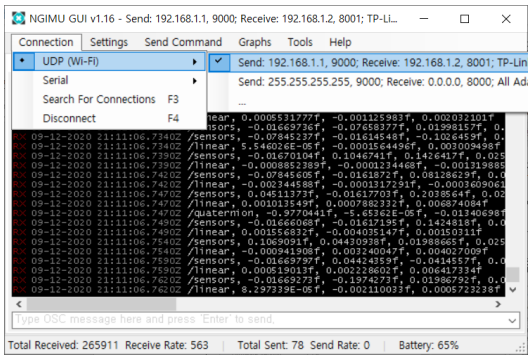


Fig. 5 WiFi connection using UDP communication

Table 5 UDP data transmission error handling

```
% Error handling for UDP data transmission
try
    data = fread(udpObj); % Receive data
    if isempty(data)
        disp('Data loss detected'); % Detect missing data
    end
catch
    disp('Transmission error occurred'); % Display transmission
error
end
```

Table 6 Filtering parameter

Setting	Value
Band selection	2.4 GHz, 5 GHz
Channel setting	Channels 1-11

Table 7 Butterworth filter implementation

```
% Design a Butterworth filter
[b, a] = butter(2, 0.1, 'low'); % 2nd-order low-pass filter
filtered_data = filtfilt(b, a, raw_data); % Apply the filter
```

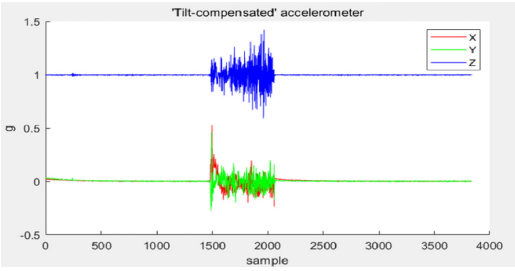
빠른 데이터 전송이 가능하지만 패킷 손실의 가능성이 있다. 이를 보완하고자 데이터 무결성 검사, 손실된 데이터에 대한 보간, 그리고 소량의 데이터 버퍼링 등을 사용했다.

2.2 데이터 전처리

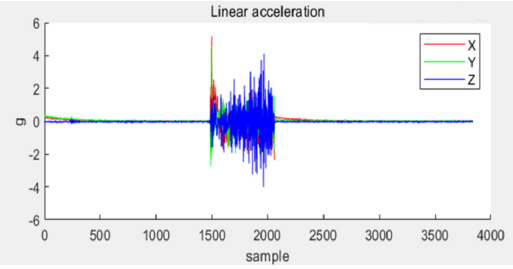
IMU 데이터는 노이즈와 드리프트를 포함할 수 있어 정밀한 전처리 과정이 필요기에 MATLAB을 활용(Table 6)했다.

고주파 노이즈 제거를 위해 저역 통과 필터(low-pass filter)를 적용했다. 구체적으로 Butterworth 필터(Table 7)를 사용했으며, 이는 평탄한 주파수 응답 특성으로 인해 선택했다. 필터링 전후의 데이터 비교 결과는 시각적으로 제시했으며, 필터링 후 고주파 노이즈가 현저히 감소해 신호의 주요 특성이 더 명확하게 드러남을 확인할 수 있다[6,7].

IMU 데이터의 시간적 불일치를 해결하고자 데이터 동기화를 했



(a) Desynchronized data



(b) Synchronization data

Fig. 6 Desynchronized and synchronization data

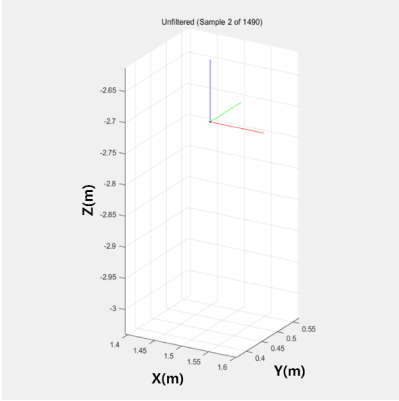


Fig. 7 6DOF visualization

다. 동기화 전후의 데이터 비교를 통해, 데이터 간의 시간적 일치성의 향상(Fig. 6)을 확인할 수 있었다[5].

2.3 데이터 통합 및 분석

2.3.1 데이터 처리

IMU 데이터의 전처리 과정은 Raw 데이터를 시작으로 변환, 노이즈 제거, 동기화, 6DOF 생성, 그리고 시각화 단계를 거친다. 이를 통해 센서 데이터가 분석 가능하게 변환된다.

2.3.2 시각화 과정과 6DOF

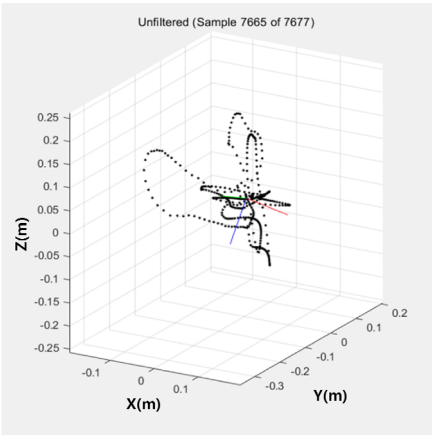
6DOF는 IMU 데이터를 3D 공간에서의 움직임으로 시각화(Fig. 7, Table 8)한다. 이는 위치(x, y, z)와 자세(roll, pitch, yaw) 데이터를 처리하며, 좌표계 변환, 회전 행렬 계산, 3D 객체 생성, 애니메이션 프레임 생성 등의 과정을 거친다[8].

Table 8 6DOF visualization function

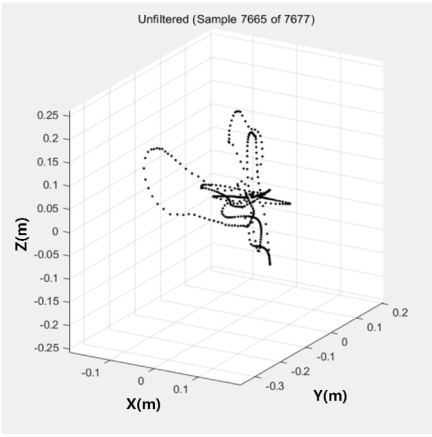
```
% Call 6DOF visualization function
jj_SixDOF(linPos, R, 'Trail', 'DotsOnly', ...
                                    % Input data and options
    'View', [30, 45]); % Set visualization angle
```

Table 9 AHRS modification code for position data extraction

```
% Remove direction values to extract pure position data
linPos = data(:, 1:3); % Extract position data (x, y, z)
```



(a) With direction values

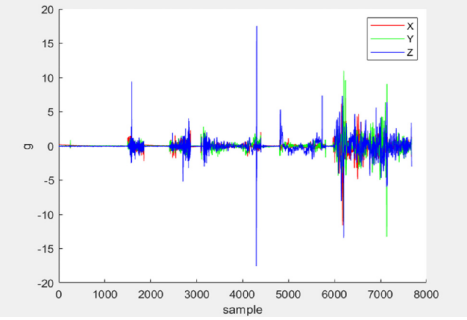


(b) Without direction values

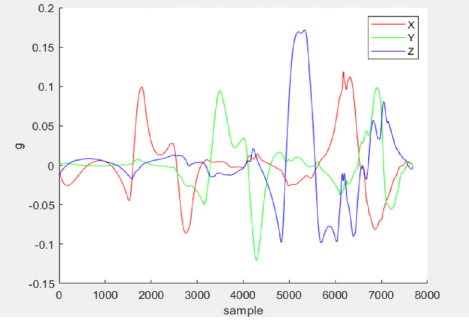
Fig. 8 Data with and without direction values

2.3.3 위치 데이터 출력

순수한 위치 데이터의 추출을 위해 MATLAB의 AHRS (attitude and heading reference system) 알고리즘(Table 9)을 수정했다. 방위 데이터 생성 단계를 제거하고 회전 행렬 변환을 억제함으로써 순수 위치 데이터만을 추출했다. 이렇게 추출된 위치 데이터는 기울기 정보를 포함하지 않아, 순수한 병진 운동(Fig. 8(a))을 나타낸다. 방향 값을 포함한 데이터와 제외한 데이터의 비교, 그리고 추출된 위치 데이터의 3D 공간 시각화(Fig. 8(b))를 했다.

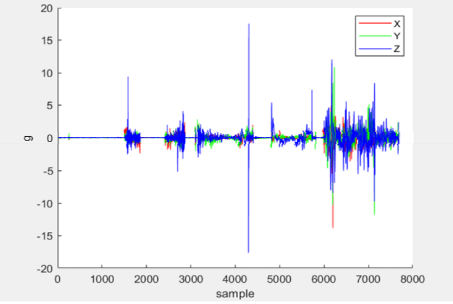


(a) Acceleration measured using tilt data

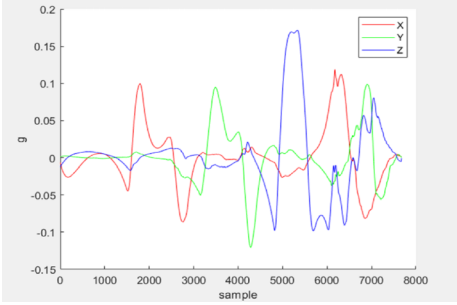


(b) Position calculated using tilt data

Fig. 9 Tilt data



(a) Acceleration measured by an accelerometer



(b) Position calculated from acceleration data

Fig. 10 Acceleration

3. 결 과

Butterworth 저역 통과 필터를 적용한 결과, 고주파 노이즈가 크게 감소하면서 주요 진동 성분이 선명해졌다. Z축이 ±20 g 범위로 가장 큰 변동 폭을 보이며, 동적 구간 SNR은 대체로 16~18 dB 정도로 산출되었다. 위치 데이터는 상대적 변위 범위가 -0.15~+0.2 g 수준으로 나타나, 추후 실제 거리(m) 환산 시 드리프트와 적분 오차에 대한 보정이 필수다.

3.1 기울기 및 가속도 센서 데이터 비교

본 연구는 IMU 데이터를 이용하여 두 가지 방식(기울기 데이터로 측정한 가속도와 가속도 센서로 측정한 가속도)을 비교했다. Fig. 9는 기울기 데이터를 기반으로 측정·계산한 가속도 및 위치를, Fig. 10은 직접 가속도 센서로 측정·계산한 가속도 및 위치를 나타낸다.

3.1.1 범위(range)

기울기 기반 가속도(Fig. 9(a))의 경우 X축은 약 -11 g~+6 g, Y축은 -13 g~+11 g, Z축은 -17g~+18 g 범위를 보였고, 가속도 센서(Fig. 10(a))의 경우 X축은 약 -5 g~+5 g, Y축은 -11 g~+11 g, Z축은 -18 g~+18 g로, Z축에서 가장 큰 스파이크(±18 g 전후)가 관찰되었다.

Table 10 Classification of static and dynamic intervals

Interval type	Sample range	Description
Static (noise)	1-1000	Negligible or minimal movement observed
Dynamic (signal)	4000-6000	Distinct and noticeable mechanical activity

3.1.2 위치 데이터 비교

기울기 기반 위치(Fig. 9(b))와 가속도 센서 기반 위치(Fig. 10(a)) 모두 -0.15 g~+0.2 g 범위의 상대적 변화를 보였다.

Fig. 9 및 Fig. 10에서 제시된 위치 데이터는 IMU 가속도 데이터를 시간에 대해 2회 적분하여 변환한 결과다. 데이터 변환 과정에서 발생하는 드리프트를 보정하기 위해 Kalman Filter를 적용했다.

3.2 샘플 범위 및 분석 구간

본 실험의 모든 데이터는 1~8000 샘플 구간에서 수집되었으며, 샘플링 주파수는 50 Hz로 설정했다. 이를 통해 약 160초간의 데이터를 획득했다. 그리고 정적 구간에서 잡음 레벨(A_{noise})을 추정하고, 동적 구간에서 실제 신호 RMS(A_{signal})를 산출(Table 10)함으로써 SNR(신호대잡음비)을 계산했다. SNR은 식 (1)과 같다[6].

$$SNR(dB) = 20\log_{10}\left(\frac{A_{signal}}{A_{noise}}\right) \quad (1)$$

3.3 Butterworth 저역 통과 필터 적용 및 SNR 분석

본 연구는 주파수 대역이 25 Hz 이하이므로, 이를 안정적으로 커버하기 위해 10 Hz 차단 주파수를 갖는 4차 Butterworth 필터를 적용했다. 필터 적용 후의 데이터(Fig. 9, Fig. 10)를 비교 분석한 결과, 고주파 성분이 상당 부분 제거되어 노이즈가 줄어든 것을 확인할 수 있다[7].

3.4 변동 폭이 가장 큰 축 및 축간 시간 지연

본 연구는 IMU 데이터를 이용해서 이동 거리의 정확도를 분석하는 실험이다. 그 결과, Fig. 9와 Fig. 10에서 Z축에서 −18 g~+18 g의 큰 진폭 변동이 확인되었으며, 이는 Z축 방향의 진동이 주요한 영향을 미치고 있음을 의미한다. 변동폭이 커진 원인은 기계적 진동 및 공진 효과, 전극 이동 중의 관성 효과 및 순간 가속도 변화, 중력 데이터 포함 및 보정 필요성 등 다양한 요인이 복합적으로 작용한 결과로 해석된다.

첫째, 기계적 진동 및 공진 효과가 변동폭 증가의 주요 원인으로 분석된다. 제조 장비에서는 특정 주파수에서 공진(resonance) 현상이 발생할 수 있으며, 이로 인해 특정 축의 가속도가 증폭될 수 있다. 본 실험에서는 전극이 X, Y축으로 이동하는 동안 장비의 구조적 진동이 Z축에서도 감지되었으며, 특히 고속 이동 중에는 미세한 진동이 축적되면서 공진 현상이 발생할 가능성이 크다. 공진 효과는 Z축에서 높은 변동폭을 유발하는 주요 요인으로 작용한 것으로 판단된다.

둘째, 전극 이동 중의 관성 효과 및 순간 가속도 변화 또한 변동폭 증가에 영향을 미쳤다. IMU는 X, Y축에 부착되어 있지만, 이동 중 순간적인 정지 또는 방향 전환이 발생하면 관성으로 인해 Z축에서도 높은 가속도가 감지될 수 있다. 특히, 전극이 급격하게 감속하거나 반전할 경우 순간적인 충격이 발생하며, 이에 따라 Z축 변동이 증가하는 경향을 보였다.

셋째, 중력 데이터 포함 및 보정의 필요성이 확인되었다. IMU 가속도 데이터는 기본적으로 중력 가속도(9.81 m/s^2)를 포함하고 있으며, 이를 보정하지 않으면 실제 이동으로 인한 가속도와 중력 성분이 합쳐져 데이터가 왜곡될 가능성이 있다. 이론적으로 Z축 가속도는 ±1 g 내외에서 변동해야 하지만, 본 실험에서는 ±18 g까지 변동하는 현상이 관찰되었다. 이는 IMU의 기준 좌표계와 장비의 이동 좌표계 간의 차이, 전극의 기울기 변화, 측정 환경에서 발생한 외부 힘의 영향 등이 복합적으로 작용한 결과로 해석된다.

또한, 필터 적용에 따른 시간 지연 현상도 분석되었다. 신호의 노이즈를 줄이기 위해 저역 통과 필터(Butterworth filter)를 적용했으며, 이를 통해 고주파 성분이 감소하는 효과를 확인했다. 그러나 필터 적용 과정에서 특정 주파수 성분이 지연되어 동일한 이벤트가 발생한 시점을 축별로 비교했을 때 약 2~5 샘플(= 40~100 ms)의 차이가 발생하는 것으로 나타났다. 이는 필터의 위상 지연(phase lag) 현상이며, 정확한 가속도 및 위치 분석을 위해서는 디지털 필터 위상 보정(phase compensation)이 필요하다[9].

4. 결 론

본 연구는 IMU 데이터를 활용해서 제조 공정에서의 이동 정확도 및 정밀도를 분석하는 방법이다. 이는 기울기 기반 가속도 측정과 가속도 센서를 이용한 직접 측정 데이터를 비교 분석하고, MATLAB을 활용해서 데이터 전처리 및 시각화를 했다. 연구를 통해 저역 통과 필터(Butterworth filter, 차단 주파수 10 Hz)를 적용해 고주파 노이즈를 제거하고 신호 대 잡음비(SNR)를 16~18 dB로 개선했다. 또한, Z축에서 ±18 g의 변동폭이 관찰되었으며, 이는 제조 장비의 구동 메커니즘, 순간 충격, 공진 효과 등의 영향을 받은 것으로 분석했다. 위치 데이터는 −0.15~+0.2 g 범위의 상대적 변위를 나타냈지만, 중력 가속도(9.81 m/s^2)를 포함하고 있어 직접 절대 위치로 변환하는 과정에서 노이즈가 발생했으나, 향후 연구에서 센서 퓨전(sensor fusion)을 통해 중력 보정하고, 적응형 필터링(adaptive filtering)을 통해 데이터 드리프트를 최소화할 수 있다. 이는 IMU 기반 이동 거리 측정의 정밀도를 높힐 수 있고, 절대 위치 측정의 신뢰성을 개선할 수 있다.

추가로, 저역 통과 필터 적용 과정에서 축간 40~100 ms의 시간 지연이 발생하는 것이 확인되었으며, 이는 필터링 과정에서 특정 주파수 성분이 지연된 결과로 판단된다. 정확한 가속도 및 위치 분석을 위해서는 디지털 필터의 위상 보정(phase compensation)을 적용하고, Kalman 필터를 활용해 이동 거리 예측 정확도를 향상할 필요가 있다.

본 연구의 IMU 기반 이동 정확도 및 정밀도 분석 방법은 정밀 이동이 요구되는 제조 공정에서 유용하게 활용될 수 있다. 특히, 전해 공정(electrochemical machining, ECM), 초정밀 CNC 가공에서 이동 거리 오차가 제품 품질에 직접적인 영향을 미치는 환경에서 적용할 수 있다. ECM에서는 전극의 미세 이동 정밀도를 실시간으로 모니터링해 불균일한 가공을 방지할 수 있고, CNC 가공은 공구 위치 보정을 자동화해 가공 오차를 최소화할 수 있다. 이 외에도, 미세 용접에서의 전극 이동 분석, 의료 로봇의 미세 움직임 평가 등 다양한 정밀 제조 및 자동화 시스템에 적용 가능할 것으로 기대된다.

References

[1] Yoo, C. K., Choi, S. W., Lee, I. B., 2008, Recent Research Trends of Process Monitoring Technology: State-of-the-Art, Korean

Chem. Eng. Res., 46:2 233-247.

[2] Yoo, K. S., Kang, Y. S., Choi, I. H., Kim, B. H., Lee, J. W., 2019, Real-Time Monitoring System during Machine Center Processing, Proc. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng. Autumn Conf., 206.

[3] Jo, S. H., Chang, T. W., Shin, K. T., Na, H. B., Park, J. W., 2009, Continuous Improvement Plan of Manufacturing Process through Real-Time Data Acquisition, Journal of the Korea Industrial Information Systems Research,14:4 75-90, https://doi.org/10.9723/jksiis.2009.14.4.07.

[4] Lee, P. -H., Song, Y. -U., Kim, Y., Heo, S., Chang-Woo Lee, C. -W., 2023, Evaluation of Shape Properties in Hybrid Laser-powder Bed Fusion Additive Manufacturing Process, J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng., 32:6 309-315, https://doi.org/10.7735/ksmte.2023.32.6.309.

[5] Yoon, S. H., Moon, S. M., Lyu, S. K., 2018, A Study on Monitoring Drilling using Torque from Main Spindle Based on PLC in CNC Machine Tools, J. Korean Soc. Manuf. Process Eng., 17:3 7-15, https://doi.org/10.14775/ksmpe.2018.17.3.007.

[6] Kim, J. C., Lee, H. D., Jin, S. A., Park, Y. H., Roh, S. Y., 2015, A Design for Realtime Monitoring System and Data Analysis Verification TA to Improve the Manufacturing Process Using HW-SW Integrated Framework, KIPS Tr. Software and Data Eng., 4:9 357-370, https://doi.org/10.3745/KTSDE.2015.4.9.357.

[7] Oh, Y. G., Park, H. S., Yoo, A., Kim, N. H., Kim, Y. H., Kim, D. C., Choi, J. U., Yoon, S. H., Yang, H. J., 2013, A Product Quality Prediction Model Using Real-Time Process Monitoring in Manufacturing Supply Chain, Journal of the Korean Institute of Industrial Engineers, 39:4 271-277, https://doi.org/10.7232/JKIIE.2013.39.4.271.

[8] Yoon, J. -S., 2022, Development of an Integrated Operation Management System for Multi-Vendors' CNC Machine Tools Based on Standardized Interfaces to Support Smart Manufacturing, J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng., 31:3 169-176, https://doi.org/10.7735/ksmte.2022.31.3.169.

[9] Ko, K. H., Sim, J. U., Hong, S.-W., 2022, Application of Input Shaping to a CNC Laser Processing Machine to Enhance Processing Precision, J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng., 31:5 346-352, https://doi.org/10.7735/ksmte.2022.31.5.346.

Junyoung Kim
Ph.D. Candidate in the Department of Mechanical Engineering, Inha University.
His research interest is System Analysis.
E-mail: 222191500@inha.edu

Sunho Chang
Ph.D. Student in the Department of Mechanical Engineering, Inha University.
His research interest is Electro Chemistry.
E-mail: preferjang@inha.edu

Eunsang Lee
Professor in the Department of Mechanical Engineering, Inha University. His research interest is Electrochemical Polishing.
E-mail: leees@inha.ac.kr