

# Symmetric Position Drift of Integration Approach in Pedestrian Dead Reckoning with Dual Foot-mounted IMU

Jae Hong Lee<sup>1</sup>, Seong Yun Cho<sup>2</sup>, Chan Gook Park<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Aerospace Engineering / ASRI, Seoul National University, Seoul 08826, Republic of Korea

<sup>2</sup>Department of Robotics Engineering, Kyungil University, Gyeongsan 38428, Republic of Korea

## ABSTRACT

In this paper, the symmetric position drift of the integration approach in pedestrian dead reckoning (PDR) system with dual foot-mounted IMU is analyzed. The PDR system that uses the inertial sensor attached to the shoe is called the IA-based PDR system. Since this system is designed based on the inertial navigation system (INS), it has the same characteristics as the error of the INS, then zero-velocity update (ZUPT) is used to correct this error. However, an error that cannot be compensated perfectly by ZUPT exists, and the trend of the position error is the symmetric direction along the side of the shoe(left, right foot) with the IMU attached. The symmetric position error along the side of the shoe gradually increases with walking. In this paper, we analyze the causes of symmetric position drift and show the results. It suggests the possibility of factors other than the error factors that are generally considered in the PDR system based on the integration approach.

**Keywords:** pedestrian dead reckoning, integration approach, symmetric position drift

## 1. INTRODUCTION

사용자의 위치를 추적하고 추적한 위치를 기반으로 클라이언트 혹은 사용자에게 서비스를 제공하는 location-based service (LBS)는 일상 생활에 이미 많이 적용되어 쉽게 볼 수 있다. LBS는 사용자의 위치 정보를 사용하는 기술이기 때문에 정확한 위치 정확도를 필요로 한다. Global navigation satellite system (GNSS)는 위치를 추정하는 기술 중 가장 쉽게 접할 수 있는 기술이지만, 실내에서는 신호의 단절로 인해서 위치 추정이 불가능하기 때문에 실내외 관계없이 서비스가 제공되어야 하는 LBS에게는 실내에서 적용하지 못한다는 한계가 있다. GNSS의 성능이 제약이 되는 환경에서 대안이 될 수 있는 기술은 무선 설비를 사용하는 여부에 따라서 분류가 된다. Wi-Fi, RFID, BLE 등 실내에 설치된 무선 수신기의 전파 정보를 사용하여 사용자의 위치를 추적하는 기술이 있다.

반면, 사용자의 신체 혹은 물체에 내장된 관성센서(IMU, inertial measurement unit)를 사용하는 보행항법은 무선 설비를 사용하는 기술과 대비되는 기술이다. 보행항법은 내장된 관성센서에 측정하는 가속도와 각속도 정보와 보행 특성을 고려하여 보행자의 위치를 추정한다 (Foxlin 2005, Kang & Han 2015). 보행항법은 신호를 적분하는 형태의 적분접근법(IA, integration approach) (Cho & Park 2019)과 걸음 검출과 보폭 추정을 누적하는 개념의 매개 변수 접근법(PA, parametric approach) (Kang & Han 2015)으로 분류할 수 있다. IA 기반 보행항법은 관성항법(INS, inertial navigation system)과 유사하게 가속도 신호를 이중 적분하여 위치를 계산한다.

IA 기반 보행 항법은 주로 관성센서가 신발에 부착되어 있는 경우에 사용한다. 관성항법을 기반으로 하고 있기 때문에 추정 오차가 누적되어 발산하는 관성항법의 특성을 가지고 있다. 그렇기에 영속도 보정(ZUPT, zero-velocity update)을 사용하여, 발산하는 보행항법의 추정 오차를 보정한다. 보행주기는 입각기(stance phase)와 유각기(swing phase)로 나눌 수 있으며, 영속도 보정은 stance phase에서 신발이 지면에 닿은 상태로 움직이지 않는 구간에서 센서의 속도가 0이라 판단하여 확장칼만필터(EKF, extended Kalman filter)로 오차를 추정하여 보정하는 형태이다.

IA 기반 보행항법은 영속도 보정으로 인해 비교적 높은 위치 추정 정확도를 제공하지만, 속도를 측정치로 사용하기 때문

Received Mar 19, 2020 Revised May 06, 2020 Accepted May 12, 2020

\*Corresponding Author

E-mail: chanpark@snu.ac.kr

Tel: +82-2-880-1732 Fax: +82-2-873-1732

Jae Hong Lee <https://orcid.org/0000-0002-8222-5435>

Seong Yun Cho <https://orcid.org/0000-0002-4284-2156>

Chan Gook Park <https://orcid.org/0000-0002-7403-951X>

**Table 1.** Specification of IMU for data acquisition.

	Gyro	Accelerometer
Noise	0.05 deg/sec/ $\sqrt{Hz}$	0.003m/sec <sup>2</sup> / $\sqrt{Hz}$
Turn-on bias	0.1 deg/sec	0.004 g

에 방위각은 기관측성이 확보되지 않아 보정할 수 없는 요소이다. 지도 정보나 복도 방향 등을 사용하여 방위각에 대한 측정치 정보를 사용하는 기법들이 연구되고 있다 (Borenstein & Ojeda 2010). 하지만, 이 기법들은 사전 정보가 필요하다는 한계가 있다. 반면, 주어진 관성센서만으로 오차를 보정하기 위해, 양쪽 신발에 각각 관성센서가 부착된 환경에서 적용할 수 있는 dual foot-mounted IMU를 사용하는 보행항법이다. 이 기법은 각각의 관성센서를 사용하여 독립적으로 위치를 추정을 하고 추정한 위치 결과를 융합하여 위치 정확도를 높이는 기법이다 (Shi et al. 2017, Chistiakov et al. 2019). 이 기법의 기반이 되는 가정은 각 신발에 추정하는 위치 결과가 이동방향을 기준으로 반대 부호의 위치 오차를 가진다는 것이다. 직선의 이동방향에 대해서 좌, 우로 드리프트 되는 현상이 있기 때문에 두 정보를 융합했을 때 위치 정확도가 개선된다는 것이다. 이러한 오차 특성은 대칭적 방위각 드리프트(symmetric heading drift)로 불린다 (Nilsson et al. 2013).

하지만, 본 논문에서는 대칭적 방위각 드리프트가 아닌 대칭적 위치 드리프트에 대해 원인을 분석한다. 대칭적 방위각 드리프트를 이용하는 다양한 연구들이 제안되어 왔지만, 원인에 대해서 분석한 논문은 없었다. 특히 방위각 오차임을 명시하고 있지만, 오차 현상을 보여주는 실험 결과에서는 위치 결과만을 제시하고 있어 방위각 오차가 추정 위치에 영향을 미쳤음을 유추할 수 밖에 없다. 본 논문에서는 대칭적 현상이 위치 추정 결과에서 볼 수 있기에 대칭적 위치 드리프트(symmetric position drift)의 관점에서 오차를 분석하고 그 원인을 밝히려고 한다. 양 발의 관성센서를 사용하는 시스템 외에도 IA 기반 보행항법의 위치 오차로 고려할 수 있는 요소를 분석한다는 것에도 의의가 있다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 2장에서는 분석을 위한 실험 환경과 대칭적 위치 드리프트가 나타나는 현상에 대해서 제시한다. 3장에서는 대칭적 오차를 분석하고 그 원인을 제시한다. 마지막 장은 본 논문의 결론이다.

## 2. SYMMETRIC POSITION DRIFT

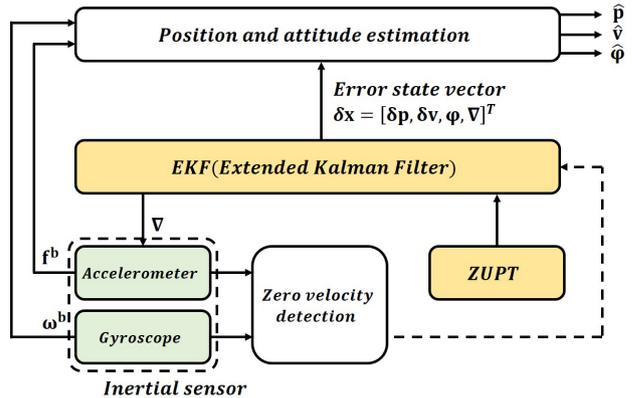
### 2.1 Methodology

대칭적 드리프트 현상을 확인 및 분석을 위한 데이터 수집을 수행했다. 수집을 위한 관성센서로 Xsens사의 MTw를 사용했고 Table 1은 센서의 성능 지표이다. 관성센서 2개를 각각 Fig. 1과 같이 양쪽 신발의 측면에 하나씩 부착했다. IA 기반 보행항법에서 관성센서를 부착하는 위치는 다양할 수 있지만, 본 논문에서는 측면에 부착한 경우를 기반으로 하고 실험 전후에 센서 부착 상태를 확인하여 이상이 없는 데이터를 기반으로 분석했다.

각 신발에 부착된 관성센서를 사용하여 IA 기반 보행항법 시스템을 통해서 위치를 추정했을 때 대칭적 위치 드리프트 현상



**Fig. 1.** Sensor location attached to the shoe.



**Fig. 2.** Diagram of IA-based PDR system.

이 있는지 확인했다. 추정 결과를 얻기 위해 적용한 보행항법 시스템의 구조는 Fig. 2이다. IA 기반 보행항법은 관성항법을 기반으로 설계되어 있고 영속도 보정을 통해서 상태변수의 오차를 추정 및 보정한다. 분석을 위해 사용한 필터의 상태변수는 11차로 3축 위치 오차( $\delta p$ ), 3축 속도 오차( $\delta v$ ), N, E축 자세( $\phi_N, \phi_E$ )와 3축 가속도 바이어스( $\nabla$ )로 구성했다. 방위각은 영속도 보정에서 가측성이 없는 상태 변수이기에 제외했다. 자이로 바이어스의 경우, 보행 전 정지상태에서 얻은 자이로 신호의 평균 값으로 사용했다. 적용한 필터 및 시스템은 H. Ju의 논문을 참고로 구성했다 (Ju & Park 2018).

### 2.2 Symmetric Position Drift Results

대칭적 드리프트 현상을 확인하기 위해서, 실험자는 70 m 길이의 직선 궤적을 걷는 실험을 20회 수행했다. 추정 위치를 나타낸 좌표계는 지표면과 평행하고 초기 이동 방향을 X축, 그 측면 방향을 Y축으로 정의했다. 보행 전 10초간 정지하여, 각 센서의 자이로 바이어스를 추정 및 제거하여 자이로 바이어스에 의한 위치 오차를 최소화 했다. 또한, 이동방향을 모든 실험에 대해서 동일하게 하기 위해서 초기 다섯 걸음 동안의 위치 정보를 사용하여 궤적과 이동방향이 평행하도록 궤적을 Z축에 대해서 회전을 시켰다.

Fig. 3은 각 신발에서 추정한 궤적의 20회 결과를 평균 한 결과이다. 파란색 궤적은 왼쪽 신발의 추정 결과 평균이고, 빨간색 궤적은 오른쪽 신발의 추정 결과 평균이다. 추정 오차가 존재하지 않으면 두 궤적 모두 X축과 평행한 궤적이 나와야 한다. 하지만, 왼쪽 신발은 Y축에 대해서 음의 방향으로 오른쪽 신발은 양의 방향으로 서로 대칭적인 방향으로 위치가 드리프트 되는 것을 확인

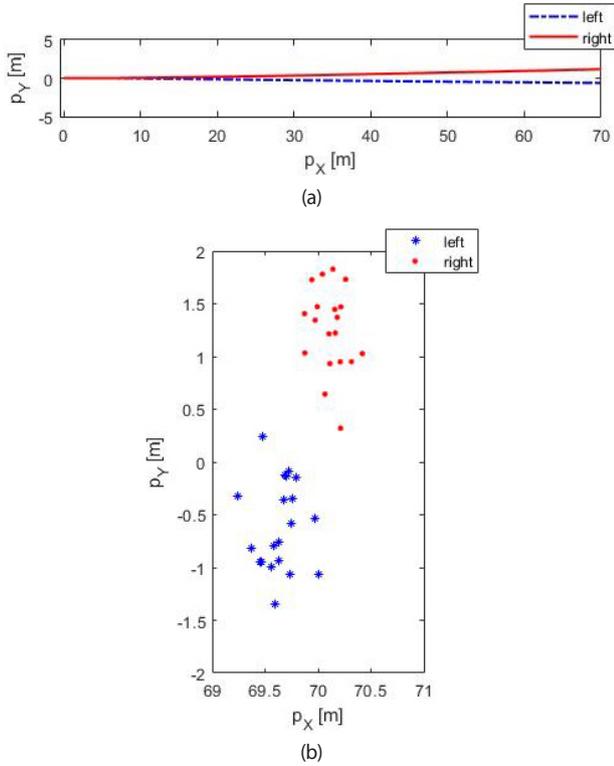


Fig. 3. Sensor location attached to the shoe.

하였다. Fig. 3b는 보행 종료 위치에서의 추정 위치를 나타낸 것이다. 20회 실험결과에 대해서 0을 기준으로 양수와 음수에 추정 결과가 분포되어 있음을 확인하였다. 대칭적 드리프트 현상은 오차가 수치까지 동일하게 대칭적인 것이 아니라, 오차의 부호가 이동방향을 기준으로 서로 반대 방향을 가지는 경향성을 의미한다. 이전 연구들에서 언급된 대칭적 드리프트 현상은 이와 같이 양쪽 신발에 부착된 관성센서를 사용하여 각각 위치를 추정하였을 때, 궤적에 대해서 서로 반대 방향으로 드리프트 되는 것을 의미한다(Nilsson et al. 2012).

### 2.3 Conditions not Related to Symmetric Position Drift

위치 오차를 야기하지만 대칭적 드리프트의 원인이 아닌 요소에 대해 분석하고 원인에서 제외했다. 드리프트 위치 오차를 야기하는 요소들이 다양하지만, 그 중 하나는 자이로 바이어스다. 2.2절에서 수행한 실험에서는 자이로 바이어스의 영향을 최소화하기 위해서 정지 상태에서 바이어스를 추정하는 과정이 있었지만, 바이어스가 대칭성에 영향을 미치는지 확인 했다. 위치 오차는 자이로 바이어스에 시간의 2차 형태로 영향을 받는다. 자이로 바이어스의 영향을 확인 하기 위해서, 각 신발에 부착된 관성센서를 10초간 정지하여 자이로 바이어스를 추정했고, 추정된 바이어스를 제거한 후 30초 동안 정지 상태인 관성센서의 방위각 추정 결과를 비교했다. 각 센서에 대해서 20회 실험을 했으며, 매회 실험마다 전원을 새로 인가하여, turn-on 바이어스에 대해서 경

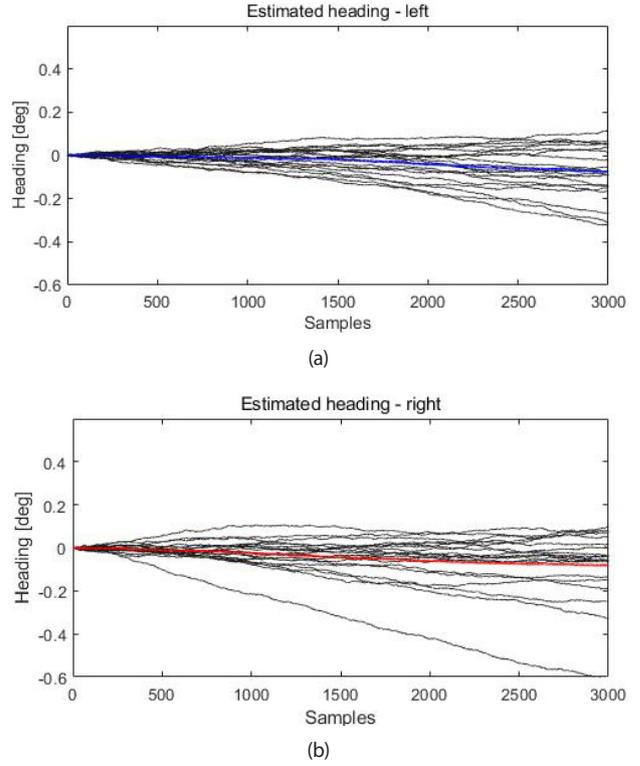


Fig. 4. Results of estimated heading. (a) using IMU on the left shoe, (b) using IMU on the right shoe.

향성을 확인했다.

Fig. 4는 각 신발에 부착된 관성센서로 추정한 방위각 결과이다. 그래프의 검은색은 20회 실험에 대한 방위각 추정 결과이고, 파란색과 빨간색은 각 신발에 따른 추정 결과의 평균이다. 평균 값과 각 실험결과를 보면, 오차는 0 deg을 기준으로 일정한 방향성이 없이 고르게 분포하는 것이 확인된다. 즉, 자이로 바이어스는 위치 오차를 야기할 수 있지만, 대칭적 방향성에 대한 원인에서 제외된다.

다음으로 실험에 사용한 센서에 의한 특정한 현상이 아닌지 확인 하여 대칭적 드리프트가 일반적인 현상인지를 확인했다. 2.2절에서 사용한 센서와 동 기종이지만 다른 한 세트를 사용하여, 동일한 실험을 수행했다. Fig. 5는 Fig. 3b와 같이 보행 종료 지점에서의 추정 위치를 나타낸 결과이다. Fig. 5a는 2.2절에서 사용한 센서이며, Fig. 5b는 다른 센서 쌍을 사용한 결과이다. 두 실험 결과를 비교하면, 종료 지점에 대해서 추정 위치의 분포는 서로 다르다. 하지만, 왼쪽 신발의 위치는 음의 방향을 오른쪽 신발의 위치는 양의 방향에 분포가 되어있는 경향성은 유사한 것을 확인 했다.

추가적으로 4명의 실험자에 대해서도 위치 오차를 비교했다. 이전 실험 결과와 유사하게 Fig. 6에서도 오른쪽 신발의 위치는 양의 방향에 왼쪽 신발의 위치는 음의 방향에 분포되어 있다. Prateek et al. (2013)과 Zhao et al. (2019)이 dual foot-mounted IMU을 사용하는 논문에서도 각 신발의 위치 오차는 진행방향을 기준으로 서로 반대 방향에 분포되어 있는 실험 결과를 확인 할 수 있다 (Niu et al. 2019). 대칭적 위치 드리프트라는 현상이 실험

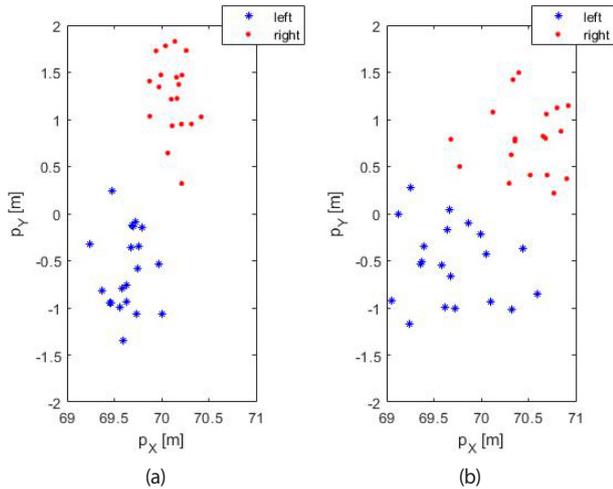


Fig. 5. Estimated position at last step using difference sensor pairs. (a) pair A, (b) pair B.

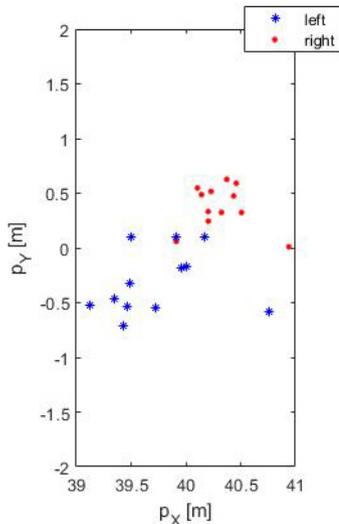


Fig. 6. Estimated position at last step by various tester.

에 사용한 특정 센서에 의해서 발생한 것이 아니고, 직선 보행 환경에서 일반적으로 확인되는 현상임을 뒷받침한다.

### 3. ANALYSIS FOR SYMMETRIC DRIFT

#### 3.1 Drift by Sampling Rate

IA 기반 보행항법에서는 가속도를 두 번 적분하여 위치를 계산한다. 식 (1)은 가속도로부터 위치를 계산하는 과정을 나타낸 것이다.

$$\begin{aligned} v^n &= f^n - g^n \\ p^n &= v^n \end{aligned} \tag{1}$$

위 과정에서 속도와 위치는 가속도로부터 계산이 된다. 가속

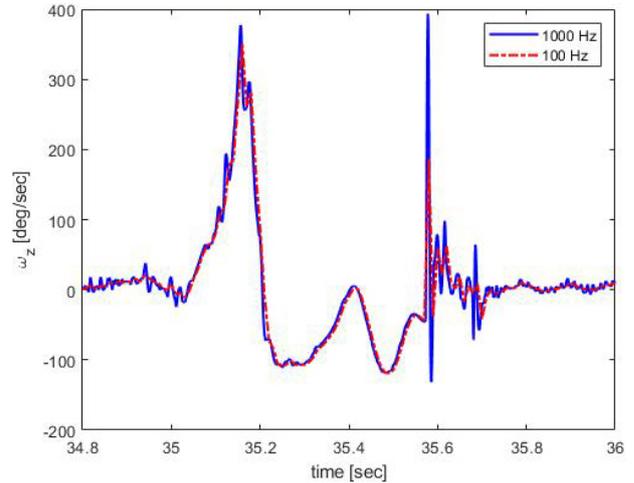


Fig. 7. Compare gyro signal according to sampling rate.

도가 오차를 가진다면, 두 인자의 오차 원인이 될 수 있다. 가속도의 오차는 센서가 측정된 신호의 오차와 바이어스로 가정할 수 있다. 가속도 바이어스는 자이로 바이어스와 마찬가지로 방향을 가지는 성분이 아니기 때문에 대칭적 드리프트의 원인이 될 수 없다. 따라서 센서의 측정 정확도가 원인일 수 있다. 식 (2)는 속도 오차에 대한 자세와 가속도, 가속도 바이어스의 관계로 유도한 결과이다.

$$\begin{aligned} \delta v^n &= [C_b^n f^b] \times \phi + C_b^n \nabla^b \\ \delta v_Y &= f_Z \phi_N - f_X \phi_D + \nabla_Y \end{aligned} \tag{2}$$

위치 드리프트의 현상을 보일 수 있는 측면 방향과 관계된 Y축 속도 오차는 X, Z축 가속도와 N, D축 자세, Y축 가속도 바이어스를 인자로 표현된다. 대칭성과 무관한 가속도 바이어스와 필터에서 상태 변수로 추정하는 N축 자세를 제외하면, 가속도 성분과 방향각인 D축 자세가 대칭적 드리프트의 원인의 가능성이 있다.

먼저, 방위각의 관점에서 오차의 관계를 분석했다. 방위각은 자이로 신호를 적분하여 산출된다. 관성센서에서 측정된 각속도 값이 부정확하다면 그만큼의 오차가 적분 되어 방위각 오차를 야기한다. 측정된 자이로 신호가 부정확할 수 있는 요소는 바이어스, 잡음, 측정 범위(dynamic range) 및 샘플링 레이트(sampling rate) 등이 있다 (Diaz et al. 2013). 본 논문에서 적용한 보행항법 시스템에서는 자이로 바이어스를 정지 상태에서 추정을 하고, 2.3절에서 대칭적 오차의 원인이 아님을 확인하였으므로 대칭적 드리프트의 원인에서 제외된다. 측정 범위는 센서가 측정할 수 있는 신호 크기의 범위를 의미한다. 실험에 사용하는 관성센서는 ±1200 deg/sec의 측정 범위를 가지고 있다. XYZ축에 대해서 각속도의 최대 값은 500 deg/sec로 측정 범위 내에 충분히 측정된다.

마지막 요소는 샘플링 레이트이다. 샘플링 레이트는 사용하는 센서마다 최대 수치가 결정이 되지만, 보행항법 시스템을 실시간으로 처리하기 위한 연산장치의 성능에 의해서도 제한이 될 수가 있다. Fig. 7은 한 걸음 동안의 Z축 자이로 신호를 1000 Hz와 100 Hz 설정에 따라 비교한 것이다. 1000 Hz 신호를 측정 위해

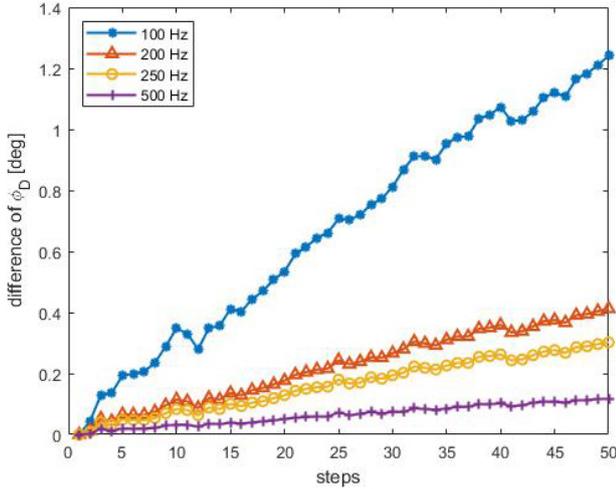


Fig. 8. Heading difference according to sampling rate at stance phase (right).

Table 2. Heading difference according to sampling rate at last step.

Sampling rate [Hz]	100	200	250	500
Heading difference [deg]	1.27	0.42	0.31	0.12

서 Microstrain의 CV5-25 센서를 사용했다. 100 Hz 신호는 이전에 사용했던 MTw를 사용했다. Fig. 7은 stance phase에서 다음 stance phase까지의 한 걸음에 대한 측정 값이다. 서로 다른 샘플링 레이트의 신호를 비교했을 때, 신호의 변화가 적은 35.2~35.5 sec 동안에는 센서 출력 값이 유사한 것을 확인 할 수 있지만, 변화가 많은 구간에서는 1000 Hz의 출력 값이 더 많은 변화를 나타내는 것을 확인 할 수 있다. 특히, 35.6 sec는 신발이 지면에 닿는 heel-strike 구간인데, 여기서는 측정되는 각속도의 최대 크기가 400 deg/sec와 200 deg/sec로 많은 차이를 보인다. 샘플링 레이트는 출력되는 자이로 신호의 정확도에 영향을 미치기 때문에 보행 동안의 신발 움직임을 표현하는데 차이를 보이게 된다. Nyquist theorem에 의해서 샘플링 레이트는 신호가 표현할 수 있는 주파수 범위를 제한하고 그 이상의 주파수 성분에 대해서는 오차가 된다.

샘플링 레이트로 인한 자이로 신호의 부정확성이 방위각에 어떻게 반영이 되는지 확인했다. 2.2절과 동일한 실험을 오른쪽 신발에 대해서 1000 Hz로 수행 후, 그 신호를 100~500 Hz로 샘플링 레이트를 낮추어 계산한 방위각과 가장 빠른 주파수인 1000 Hz 신호의 방위각과 비교 했다. Fig. 8은 매 걸음 마다 1000 Hz 신호로 계산한 방위각과 그 외의 신호로 계산한 방위각 차이이다. 걸음 수가 점차 증가하면서 각각 방위각 차이가 선형적으로 증가하는 것을 확인할 수 있다. 특히, 샘플링 레이트가 작을수록 기울기가 점차 커졌다. Table 2는 마지막 위치에서는 방위각 차이이다. 샘플링 주기에 따른 방위각 차이가 기하급수로 커지는 것을 확인할 수 있다. 1000 Hz의 방위각이 오차가 없이 참값에 가깝다면, 샘플링 레이트에 의해서 방위각 오차가 발생하고 드리프트의 원인이 될 수 있음을 유추할 수 있다. 샘플링 레이트를 변화한 결과 값에 1000 Hz 신호의 결과 값을 뺀 수치가 항상 양수이다. 방위각 오차의 영향을 받아 위치 오차의 부호도 양수가 된다. 이는 대칭

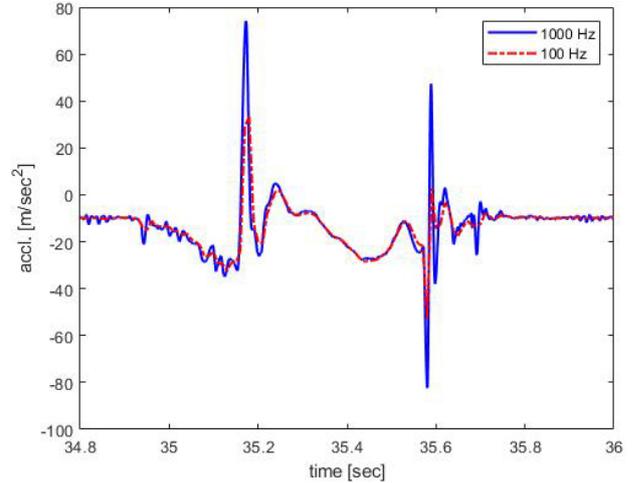


Fig. 9. Compare acceleration signal according to sampling rate.

적 드리프트에서 오른쪽 신발의 오차가 Y축에 대해서 양의 부호를 가지는 것과 같은 경향성을 보인다. 자이로 바이어스의 잔여 오차와 자이로의 random walk에 의한 방위각 오차는 식 (3)과 (4)로 추정 된다.

$$\delta\psi_{bias} = \sigma_{align} \times t$$

where

$$\sigma_{align} = \frac{\sigma_{\omega}}{\sqrt{freq. \times aligntime}}, \sigma_{\omega} = \text{noise of gyro} \quad (3)$$

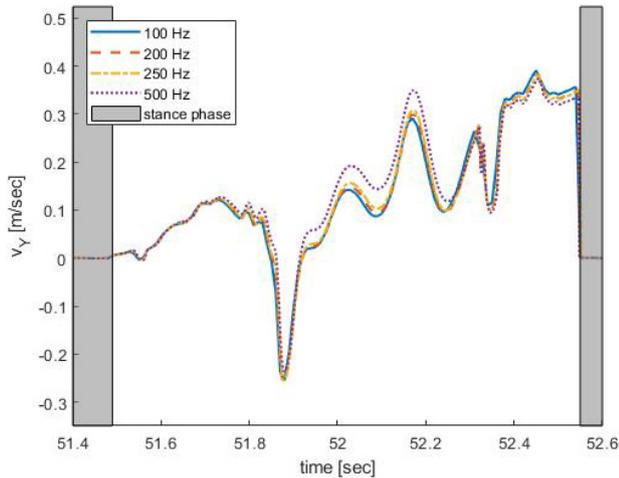
$$\delta\psi_{RW} = RW \times \sqrt{t}$$

where

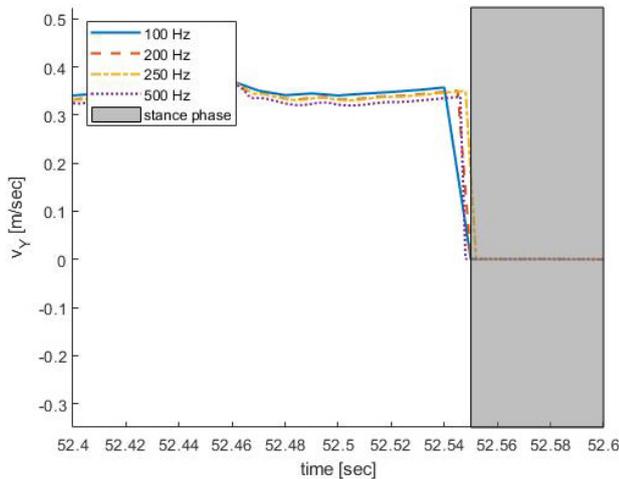
$$RW = \frac{\sigma_{\omega}}{\sqrt{freq.}} \quad (4)$$

Fig. 8의 결과인 50 걸음의 약 50 sec의 보행 시간과 정렬 시간 10 sec 조건에서 식 (3-4)에 의해 방위각 오차는 0.15 deg가 된다. Fig. 8에서 100 Hz의 신호의 방위각 차이는 50 걸음에 대해서 약 12.5 deg으로 자이로의 바이어스와 잡음에 비해 더 큰 방위각 오차가 발생한 것을 알 수 있다. 즉, 샘플링 주기에 의해서 방위각 오차가 발생을 하고 이는 대칭적 드리프트의 원인이다.

다음으로 드리프트와 가속도 신호의 관계를 분석했다. 자이로 신호에 대해서 분석을 했듯이 가속도 신호의 부정확성도 바이어스, 잡음, 측정 범위 및 샘플링 레이트에 의해서 발생할 수 있다. 자이로와 동일하게 바이어스는 대칭성의 원인이 될 수 없다. Fig. 9은 1000 Hz와 100 Hz의 Z축 가속도 신호를 비교한 것이다. 센서의 측정 범위가 16 g이기 때문에 측정 범위 내에서 가속도가 측정되는 것을 확인할 수 있다. 하지만, 자이로 신호와 마찬가지로 샘플링 레이트에 의해서 측정되는 신호가 신발 움직임에 따라서 차이를 보인다. Stance phase가 끝나는 지점인 35.2 sec와 heel-strike구간인 35.6 sec에서 측정되는 신호의 크기가 차이를 보였고 이는 가속도 신호가 샘플링 주기에 의해서 부정확해지는 것을



(a)



(b)

Fig. 10. Y-axis velocity according to sampling rate in one step (right). (a) is represented in a step, and (b) is represented at a moment before zupt.

Table 3. Y-axis velocity according to sampling rate before stance phase.

Sampling rate [Hz]	100	200	250	500
Y-axis velocity [m/sec]	0.3575	0.3506	0.3502	0.3379

뒷받침한다.

가속도 신호의 부정확성이 속도에 미치는 영향을 확인하기 위해서, 샘플링 레이트에 따른 Y축 속도를 비교했다. Stance phase에서 영속도 보정을 수행하기 때문에 추정된 속도는 0으로 보정된다. 신발의 움직임이 걸음 형태에 따라 급격히 정지한다고 해도, 속도가 0으로 급격히 변할 수는 없다. 필터에서 속도 오차를 추정하는데, 추정된 오차가 클수록 영속도와 비교해서 오차가 더 크다고 가정할 수 있다. Fig. 10은 샘플링 레이트에 따라 Y축 속도 추정치를 한걸음 동안에 대해서 나타낸 것이다. Swing phase에서 속도는 신발 움직임에 따라 자유롭게 변하고 있다. Stance phase에 돌입하면서 영속도 보정에 의해서 속도가 0으로 떨어지는 것을 확인이 된다. 이때, 샘플링 레이트에 따라 stance phase 직전의 속도 값이 다르다. 속도 오차가 영속도로 보정되는 순간

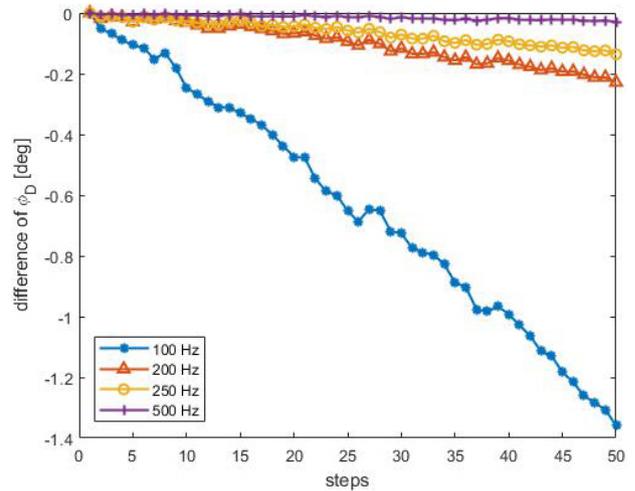


Fig. 11. Heading difference according to sampling rate at stance phase (left).

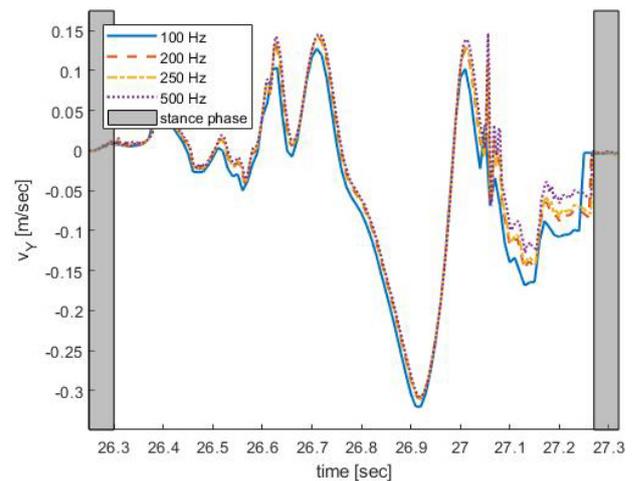


Fig. 12. Y-axis velocity according to sampling rate in one step (left).

이기 때문에 오차가 작을수록 stance phase 직전의 속도가 0에 가까워야 한다. 하지만, Fig. 10의 결과 샘플링 레이트에 따라 그 직전의 속도가 0이 오차를 가지고 있음이 확인된다. Table 3은 stance phase 직전의 속도이다. 샘플링 레이트가 작을수록 Y축 속도의 크기가 큰 것을 알 수 있다. 이는 샘플링 레이트에 의해서 측정된 가속도 신호에 오차가 있고, 속도에 그 영향이 반영된 것을 의미한다. 영속도 보정에 의해서 매 걸음마다 속도 오차는 보정이 된다. 하지만, 영속도 구간을 제외하고는 속도를 보정할 수 없기 때문에, 그 동안 발생한 오차는 위치 오차로 누적되어 드리프트의 원인이 된다. Table 3의 값은 양수인데 적분 되게 되면 위치도 양의 방향으로 오차를 가진다. 이는 오른쪽 신발의 드리프트 방향이 양수인 것과 같은 경향성이다.

### 3.2 Symmetric Gait Motion

3.1절에서 위치 드리프트의 원인에 대해서 분석을 했다. 그리고 오른쪽 신발에 대한 실험 결과가 Y축의 양의 방향으로 발생

하는 것에 대해서도 분석이 되었다. 대칭적 드리프트가 성립하기 위해서는 왼쪽 신발에 대해서는 음의 방향으로 드리프트가 발생하는 원인에 대해서 분석이 필요하다. 사람이 보행을 할 때, 각 발의 움직임이 대칭적일 것이라고 생각은 된다. Forczek & Staszkiwicz (2012)은 일반적인 걸음에서 두 발의 움직임이 얼마나 대칭적인지를 데이터를 수집하고 분석했다. 이 연구 결과에 의하면, 보행 시 좌우 발 동작은 10% 이내의 비대칭성을 가진다. 즉, 90%는 대칭적인 형태로 양쪽 발이 움직이는 것이다.

위치 드리프트를 야기하는 원인은 관성센서에서 측정되는 각 속도와 가속도의 부정확성이었다. 두 신호는 신발의 움직임을 측정하는 신호이다. 좌우 발 동작이 대칭적이라면, 비슷한 위치에 부착된 관성센서에서 측정되는 신호가 방향성이 대칭으로 형태는 유사할 것이다. 자이로 신호는 X,Y축이 유사하고 Z축은 대칭되게, 가속도 신호는 X,Z축이 유사하고 Y축이 대칭된다. 방위각 오차와 속도 오차에 대한 축의 신호가 형태는 유사하지만 대칭적인 형태를 보인다. Fig. 11은 왼쪽 신발에 대해서 3.1절의 과정을 수행한 결과이다. 샘플링 레이트가 작을수록 방위각 오차의 증가율이 증가함을 확인했다. Fig. 12는 한걸음 동안의 측면 속도이다. Fig. 10과 유사하게 stance phase 직전에 속도 오차에 의해서 급격히 영속도로 보정되는데, 그 값이 샘플링 레이트가 작을수록 커진다. 방위각과 속도에 대해서 그 경향성이 오른쪽 발과 유사함을 확인했다. 왼쪽 신발에서도 오른쪽 신발과 동일한 원인으로 인해서 드리프트가 발생하고 그 영향이 방위각과 속도에 반영되는 것을 뒷받침한다.

다만, 방위각 차이와 속도에 대해서 확인하고자 하는 경향성은 유사하지만 차이의 정도와 신호의 형태가 조금 다르다. 사람의 보행 동작이 데칼코마니와 같이 정확히 대칭일 수는 없기 때문에, 정도의 차이와 형태의 차이가 존재하는 것으로 유추된다. 또한, Fig. 1와 같이 유사한 위치에 각 신발의 유사한 위치에 센서를 부착하고자 했지만, 약간의 차이로 인해서 측정 신호에 차이가 생겼을 수도 있다.

드리프트의 원인이 센서의 출력값의 부정확성이므로 대칭적인 동작에 대해서 부정확성도 대칭적으로 발생하게 되고 이로 인해서 방위각과 측면 속도가 드리프트 현상은 동일하지만 방향성이 반대인 현상이 확인되었다.

## 4. CONCLUSIONS

본 논문에서는 양쪽 신발에 부착된 관성센서를 사용한 IA 기반 보행방법에서 서로 대칭적인 방향으로 드리프트가 발생하는 현상을 확인하고 그 원인에 대해서 분석했다. 드리프트의 원인으로서는 불충분한 샘플링 레이트로 인해서 측정 신호의 부정확성이 존재하고 이로 인해 속도와 방위각에 오차가 반영되어 위치에 영향을 미치게 되는 것이다. 또한, 드리프트가 되는 방향이 대칭인 이유는 보행 동작이 대칭이기 때문에 측정 신호가 측면 방향에 대해서 대칭이게 되고 오차의 방향도 서로 반대 방향을 가지게 된다. 본 논문에서는 대칭적 위치 드리프트가 발생하는 차이로 바이어스가 아닌, 샘플링 레이트에 의한 것임을 규명했다.

## ACKNOWLEDGMENTS

이 논문은 2018년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기술진흥센터의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2018-0-00781, 요 구조자 탐색용 휴먼 증강 소방헬멧 및 화재진압 지원시스템 개발).

## AUTHOR CONTRIBUTIONS

Jae Hong Lee contributed to the conceptualization of the idea, analysis experiment results, and writing original draft. Seong Yun Cho contributed to support the analysis results and reviewed the manuscript. Chan Gook Park supervised the research and reviewed the manuscript as a project administrator. All authors discussed the proposed results.

## CONFLICTS OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

## REFERENCES

- Borenstein, J. & Ojeda, L. 2010, Heuristic drift elimination for personnel tracking systems, *The Journal of Navigation*, 63, 591-606. <https://doi.org/10.1017/S0373463310000184>
- Chistiakov, I. A., Nikulin, A. A., & Gartsev, I. B. 2019, Pedestrian dead-reckoning algorithms for dual foot-mounted inertial sensors, *Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS)*, 27-29 May 2019, Saint Petersburg, Russia, pp.1-8. <https://doi.org/10.23919/ICINS.2019.8769341>
- Cho, S. Y. & Park, C. G. 2019, Gyro Signal Processing-based Stance Phase Detection Method in Foot Mounted PDR, *Journal of Positioning, Navigation, and Timing*, 8, 49-58. <https://doi.org/10.11003/JPNT.2019.8.2.49>
- Diaz, E. M., Heirich, O., Khider, M., & Robertson, P. 2013, Optimal sampling frequency and bias error modeling for foot-mounted IMUs, *2013 Int. Conf. on Indoor Positioning and Indoor Navigation*, 28-31 Oct. 2013, Montbeliard-Belfort, France, pp.1-9. <https://doi.org/10.1109/IPIN.2013.6817922>
- Forczek, W. & Staszkiwicz, R. 2012, An evaluation of symmetry in the lower limb joints during the able-bodied gait of women and men, *J. Hum. Kinet.*, 35, 47-57. <https://doi.org/10.2478/v10078-012-0078-5>
- Foxlin, E. 2005, Pedestrian tracking with shoe-mounted inertial sensors, *IEEE Comput. Graph. Appl.*, 25, 38-46.

<https://doi.org/10.1109/MCG.2005.140>

- Ju, H. & Park, C. G. 2018, A pedestrian dead reckoning system using a foot kinematic constraint and shoe modeling for various motions, *Sensors and Actuators A: Physical*, 284, 135-144. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2018.09.043>
- Kang, W. & Han, Y. 2015, SmartPDR: Smartphone-based pedestrian dead reckoning for indoor localization, *IEEE Sensors Journal*, 15, 2906-2916. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2014.2382568>
- Nilsson, J., Skog, I., & Händel, P. 2012, A note on the limitations of ZUPTs and the implications on sensor error modeling, *Int. Conf. on Indoor Positioning and Indoor Navigation*, Montbeliard-Belfort, France, Nov 13-15, 2012.
- Niu, X., Li, Y., Kuang, J., & Zhang, P. 2019, Data fusion of dual foot-mounted IMU for pedestrian navigation, *IEEE Sensors Journal*, 19, 4577-4584. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2019.2902422>
- Prateek, G. V., Girisha, R., Hari, K. V. S., & Händel, P. 2013, Data fusion of dual foot-mounted INS to reduce the systematic heading drift, In *2013 4th International Conference on Intelligent Systems, Modelling and Simulation*, 29-31 Jan. 2013, Bangkok, Thailand, pp.208-213. <https://doi.org/10.1109/ISMS.2013.46>
- Shi, W., Wang, Y., & Wu, Y. 2017, Dual MIMU pedestrian navigation by inequality constraint Kalman filtering, *Sensors*, 17, 427. <https://doi.org/10.3390/s17020427>
- Zhao, H., Wang, Z., Qiu, S., Shen, Y., Zhang, L., et al. 2019, Heading Drift Reduction for Foot-mounted Inertial Navigation System via Multi-Sensor Fusion and Dual-Gait Analysis, *IEEE Sensors Journal*, 19, 8514-8521. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2018.2866802>



**Jae Hong Lee** received the B.S. degree in the School of Mechanical and Electrical Control Engineering at Handong Global University and M.S. degree in the Department of Mechanical and Aerospace Engineering of Seoul National University, Seoul, South Korea, in 2017 and 2019, respectively, where he is currently pursuing the Ph.D. degree with the Department of Mechanical and Aerospace Engineering. His research interests are pedestrian dead reckoning and inertial navigation systems.



**Seong Yun Cho** received the B.S., M.S., and Ph.D. degrees in Control and Instrumentation Engineering from Kwangwoon University in 1998, 2000, and 2004, respectively. From 2004 to 2013, he was with Electronics and Telecommunications Research Institute as a senior researcher. In 2013, he joined the faculty of the Department of Robotics Engineering at Kyungil University, where he is currently an associate professor. His current research topics include positioning and navigation systems, filtering theory for linear/nonlinear systems, sensors-based motion detection, and LBS application systems.



**Chan Gook Park** received the B.S., M.S., and Ph.D. degrees in control and instrumentation engineering from the Seoul National University, Seoul, Korea, in 1985, 1987, and 1993, respectively. He worked with Prof. Jason L. Speyer about peak seeking control for formation flight at University of California, Los Angeles (UCLA) as a postdoctoral fellow in 1998. From 1994 to 2003 he was with the Kwangwoon University, Seoul, Korea, as an Associate Professor. In 2003, he joined the faculty of the School of Mechanical and Aerospace Engineering at the Seoul National University, Korea, where he is currently a Professor. In 2009, He was a visiting scholar with the Department of Aerospace Engineering at Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA. He served as a chair of IEEE AES Korea Chapter until 2009. His current research topics include advanced filtering techniques, high precision INS, GPS/INS integration, MEMS-based pedestrian dead reckoning, and visual-inertial navigation.