

저가형 관성센서를 이용한 보행자 관성항법 시스템의 성능 향상

Performance Improvement of a Pedestrian Dead Reckoning System using a Low Cost IMU

김 윤 기, 박 재 현, 곽 휘 권, 박 상 훈, 이 춘 우, 이 장 명*
(Yun-Ki Kim¹, Jae-Hyun Park¹, Hwye-Kuen Kwak², Sang-Hoon Park², ChoonWoo Lee², and Jang-Myung Lee¹)

¹Electrical Engineering, Pusan National University

²FCS Group, SAMSUNGTHALES

Abstract: This paper proposes a method for PDR (Pedestrian Dead-Reckoning) using a low cost IMU. Generally, GPS has been widely used for localization of pedestrians. However, GPS is disabled in the indoor environment such as in buildings. To solve this problem, this research suggests the PDR scheme with an IMU attached to the pedestrian's waist. However, despite the fact many methods have been proposed to estimate the pedestrian's position, but their results are not sufficient. One of the most important factors to improve performance is, a new calibration method that has been proposed to obtain the reliable sensor data. In addition to this calibration, the PDR method is also proposed to detect steps, where estimation schemes of step length, attitude, and heading angles are developed. Peak and zero crossings are detected to count the steps from 3-axis acceleration values. For the estimation of step length, a nonlinear step model is adopted to take advantage of using one parameter. Complementary filter and zero angular velocity are utilized to estimate the attitude of the IMU module and to minimize the heading angle drift. To verify the effectiveness of this scheme, a real-time system is implemented and demonstrated. Experimental results show an accuracy of below 1% and below 3% in distance and position errors, respectively, which can be achievable using a high cost IMU.

Keywords: IMU, pedestrian dead-reckoning, calibration, step detection, step length

I. 서론

보행자를 위한 위치인식 기술은 일반적으로 GPS (Global Positioning System)가 주로 사용되고 있다. GPS는 오늘날 대표적인 위성 기반의 전파 항법장치로서 비교적 정확하고 절대적인 위치를 제공해 준다. 하지만 건물안과 같은 실내나 터널 같은 신호 음영지역에서는 단독으로는 사용이 불가능하다. 이를 해결하기 위하여 WLAN [1], UWB [2], 초음파 [3], PDR [4-6]을 융합한 위치인식 시스템이 연구되고 있다. WLAN, UWB, 초음파를 사용한 위치인식은 GPS 음영지역에서 절대적인 위치를 측정할 수 있다는 장점이 있지만, 추가적인 인프라를 구축하여야 한다는 단점이 있다. 따라서, 본 논문에서는 관성센서만을 이용한 PDR 방식을 사용하여 보행자의 위치를 추정하고자 한다.

PDR은 보행자가 걸음에 의해 위치를 변화시킨다는 것에 기반하여 개발된 추측항법시스템이다. 이동하면서 발생하는 걸음 정보를 이용하여 거리와 이동방향을 측정하여 처음의 위치로부터 이동한 위치를 알 수 있다. 이 때의 걸음 정보는 관성측정장치(IMU: Inertial Measurement Unit)를 이용하여 얻는다. 관성 센서를 이용하여 보행자의 보폭을 얻는 기법은 가

속도의 이중적분[7]을 통해 구하거나 보행자의 걸음모델을 기반[8]으로 구하는 두 가지 방법으로 크게 나뉜다. 이중적분을 통한 보폭 추정의 경우, 정확한 가속도를 얻기 위하여 주로 발에 센서가 장착이 되고, 가속도 센서로부터 걸음을 걷는 동안의 가속도를 측정하여 거리 값을 구한다. 이때 발생하는 누적오차를 최소화 하기 위하여 주로 영속도 보정(ZUPT: Zero-velocity UPdaTe)기법을 사용한다[9]. 걸음모델기반 기법은 주로 허리에 장착되며 보행자의 이동 중 발생하는 특성 모델링을 통하여 보폭을 추정한다. 걸음모델기반의 기법은 모델 파라미터를 구해야 한다는 단점이 있지만 좀 더 실용적으로 사용할 수 있다는 장점이 있다.

본 논문에서는 저가형 관성센서를 허리에 부착하여 보행자의 위치추정을 할 수 있는 시스템을 소개하고자 한다. 각 센서의 모델링과 보정(calibration), 온도보상을 통하여 정확한 센서 값을 얻고, 이 센서 값을 이용하여 걸음 검출과 보폭 추정, 진행 방향을 추정한다. 최종적으로 얻어진 보폭과 진행 방향을 통해 보행자의 위치를 인식하게 된다.

논문의 구성은 다음과 같다. II 장에서는 PDR 시스템의 하드웨어와 소프트웨어 구성에 대해 소개한다. III 장에서는 센서 모델링 및 보정 기법을 설명한다. IV 장에서는 PDR 알고리즘인 걸음 검출, 보폭 추정, 진행 방향 추정 및 dead-reckoning 기법을 설명하고 V 장에서 실험을 통하여 보행자의 위치인식 알고리즘을 검증한다. 마지막으로 VI 장에서 결론을 맺는다.

II. PDR 시스템 구성

PDR 시스템을 구현하기 위해서는 MEMS (MicroElectro Mechanical System)형 3축 가속도 센서와 3축 자이로 센서가

* 책임저자(Corresponding Author)

Manuscript received March 14, 2012 / revised January 7, 2013 / accepted February 14, 2013

김윤기, 박재현, 이장명: 부산대학교 전기전자공학부
(mecah8404@pusan.ac.kr/jae-hyun@pusan.ac.kr/jmlee@pusan.ac.kr)
곽휘권, 박상훈, 이춘우: 삼성탈레스
(hk79.kwak@samsung.com/sh75.park@samsung.com/cw0403.lee@samsung.com)

※ 본 연구는 (부산대학교 특수환경 Navigation/Localization 기술연구 센터를 통한) 삼성탈레스(주) 자체과제(XSE-110122) 지원에 의하여 연구되었음.



그림 1. PDR 시스템 하드웨어 모듈.
Fig. 1. Hardware module of PDR system.

표 1. IMU 센서 사양.

Table 1. Specifications of IMU.

| Accelerometer – ADXL345 | |
|-------------------------|------------------------|
| Range | ±16 g(max.) |
| Sensitivity | 4 mg/LSB |
| RMS noise | < 1.0 LSB |
| Gyroscope – ITG3200 | |
| Range | ±2000 deg/sec |
| Sensitivity | 14.375 LSB / (deg/sec) |
| RMS noise | 0.38 deg/sec |

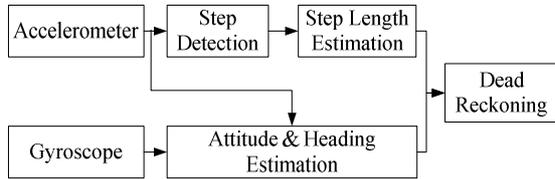


그림 2. PDR 시스템 전체 구성.
Fig. 2. PDR system process.

사용되었다. 가속도 센서는 Analog Device사의 ADXL345, 자이로 센서는 InvenSense사의 ITG3200을 사용하였다. 센서 데이터 처리를 위한 MPU로는 ARM cortex-M3를 사용하였고 블루투스 통신을 통해 컴퓨터와 데이터 송수신이 가능하다. 그림 1에 제작된 PDR 시스템 하드웨어 모듈에 사용된 두 센서의 사양을 표 1에 나타내었다. 하드웨어 모듈은 짐계를 부착하여 허리띠에 장착할 수 있게 제작하였다.

PDR 시스템의 전체 구조는 그림 2와 같다. 가속도 센서 신호를 이용하여 걸음 검출(step detection)과 보폭 추정(step length estimation)을 하고, 자이로 센서를 이용해서 자세(altitude)와 방향각(heading angle)을 측정한다. 자이로 센서의 자세 누적오차는 가속도 센서를 사용해서 보상 가능하다. 걸음이 검출된 시점에서 계산된 보폭과 방향각을 이용해 보행자의 위치를 계산한다.

III. 센서 보정

센서 보정은 센서의 출력 값이 데이터시트에 명시된 값과 동일한 값이 나오도록 보정을 하는 것이다. 이 때 발생하는 오차는 각 센서마다 다르기 때문에 정확한 성능을 얻기 위해서는 각 센서마다 개별적인 보정을 통해서 오차 값을 제거해야 한다. 특히 저가형 센서를 사용한 PDR 시스템에서는

이런 오차가 큰 위치 오차를 유발하게 되므로 보정이 매우 중요한 요소라 할 수 있다.

1. 센서 모델

일반적으로 3축 MEMS 관성 센서는 다음과 같은 선형모델 식으로 나타낼 수 있다.

$$V = SMu + b \tag{1}$$

여기서

$V = [v_x \ v_y \ v_z]^T$: 센서의 출력 값,

$u = [u_x \ u_y \ u_z]^T$: 오차가 없는 센서의 실제 값,

$b = [b_x \ b_y \ b_z]^T$: 센서의 바이어스 오차(bias error),

$M = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix}$: 센서의 비정렬 오차(misalignment

error)와 비 직교 오차(non-orthogonal error),

$S = \text{diag}[S_x \ S_y \ S_z]$: 환산계수(scale factor)

를 나타낸다. 식 (1)은 식 (2)와 같이 간략히 나타낼 수 있다.

$$V = Au + b, \tag{2a}$$

$$A = SM \tag{2b}$$

여기서 A는 환산계수, 비정렬 오차, 비 직교 오차가 결합된 3x3 행렬이다. 최종적으로 구하고자 하는 보정된 센서의 값 u는 다음과 같다.

$$u = A^{-1}(V - b) \tag{3}$$

2. 온도 바이어스 보상

관성 센서를 이용한 관성항법에서 오차의 주된 원인 중 하나는 바이어스 오차에 의한 누적오차이다. 바이어스 오차는 온도에 영향을 크게 받기 때문에 온도보상이 필요하다. 본 논문에서는 가속도와 자이로 센서에 온도 바이어스 보상을 먼저 한 후 식 (3)의 파라미터를 구하였다. 온도보상기법은 3점 보상, 선형 근사(linear fitting), 다항곡선 근사(polynomial curve fitting) 등이 사용된다. 3점 보상이나 선형 근사는 간단한 계산을 통해 보상이 가능하지만 온도와 센서 출력 값이 항상 선형일 때만 정확한 보정이 가능하다. 다항곡선 근사는 둘 사이의 관계가 비선형이어도 정밀한 보상이 가능하지만 보다 정밀한 보상을 위해서는 고차 다항식이 요구되어 연산 시간이 증가된다는 단점이 있다. 본 논문에서는 비선형에도 가능하고 계산 량이 적은 2차 다항곡선 근사를 사용하였다. 온도 바이어스가 보상된 센서 값 V_{ic} 는 식 (4)와 같다.

$$V_{ic} = V - b_i \tag{4}$$

여기서 $b_i = k_2 t^2 + k_1 t + k_0$ 이며

$$k_2 = [k_{2x} \ k_{2y} \ k_{2z}]^T, \quad k_1 = [k_{1x} \ k_{1y} \ k_{1z}]^T,$$

$k_0 = [k_{0x} \ k_{0y} \ k_{0z}]^T$ 이다. 식 (3)에 V 대신 V_{ic} 를 대입하면 온도 바이어스를 보정한 식 (5)가 된다.

$$u = A^{-1}(V_{ic} - b) \tag{5}$$

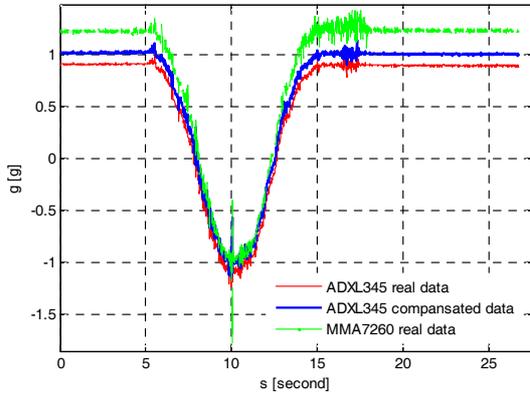


그림 3. 가속도 센서의 보정 전후 비교.
Fig. 3. Comparison before and after calibration of accelerometer.

3. 가속도 센서 보정

일반적으로 모든 센서들은 공장에서 출하 될 때 오차가 존재하며 가속도 센서 또한 오차가 존재 하기 때문에 오차를 제거 할 필요가 있다. 가속도 센서는 움직임이 없는 정지 상태에서는 중력가속도 g 값만을 가진다. 이를 바탕으로 가속도 센서 보정에 사용할 수 있다. 3축 가속도 센서는 지구의 중력 방향과 수직인 6개의 자세에서 가속도 값이 각각 $\pm 1g$ 값을 가지게 된다. 6개의 자세에서 가속도 센서를 수평으로 놓고 그때의 각각의 가속도 값을 수집한 후 최소자승법을 통해 \mathbf{A}^{-1} 과 \mathbf{b} 를 구한다. 그림 3은 보정 전후의 가속도 신호를 나타낸 것으로 z 축을 1 g 상태에서 회전시켜 -1 g로 두었다가 다시 원래 위치로 두었을 때의 신호의 모습이다. 본 논문에서 사용하는 ADXL345센서와 시중에 파는 MMA7260의 가속도 센서의 real data를 보면 오차가 존재하는 것을 확인 할 수 있다. 오차를 보정하면 ADXL345 compensated data와 같이 1g를 기준으로 값이 보상이 되는 것을 확인 할 수 있다.

4. 자이로 센서 보정

자이로 센서의 오차 파라미터 추정은 기준 값을 알고 있다는 가정 하에서 측정된 각속도 값과의 오차 정보를 이용하여 오차 파라미터들을 추정하므로 가속도 센서와는 다르게 rate table과 같은 회전 측정 장치가 있어야 가능하다. 자이로의 바이어스 오차는 자이로가 정지상태에 있을 때 자이로의 각축의 센서 데이터의 출력의 평균을 통해 구한다. 이 값은 온도 바이어스 보상을 통해 구한 값과 동일하기 때문에 자이로 센서의 바이어스 \mathbf{b} 는 무시한다. 따라서 식 (5)는 다음 식 (6)으로 나타낸다.

$$\mathbf{u} = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{V}_{\omega} \tag{6}$$

\mathbf{A}^{-1} 값의 추정은 rate table에서 나오는 각속도 실제 값 \mathbf{u} 와 각각의 자이로 축의 측정값 \mathbf{V}_{ω} 를 이용하여 최소자승법을 사용하였다.

IV. 보행자 관성 항법

1. 걸음 검출

보행자 관성 항법시스템은 사람의 걸음을 기반으로 위치를 추정하기 때문에 걸음 검출이 정확하게 구현되어야 한다. 주로 사용되는 걸음 검출 기법은 피크치 검출 기법(peak

detection), 일정 구간 검출기법(flat zone detection), 영교차점 검출기법(zero crossing detection method) 등이 있다. 일정 구간 검출기법은 IMU 센서가 발에 장착되었을 때만 사용이 가능하다. 본 논문과 같이 발이 아닌 허리에 장착된 경우에는 대부분 가속도 센서의 패턴을 이용해서 걸음을 검출한다[10]. 본 논문에서는 걸음 검출을 위하여 피크치 검출 기법과 영교차점 검출 기법을 결합하여 사용하였다[11,12].

가속도 센서는 중력 가속도의 영향을 받기 때문에 자세에 따라 값이 달라진다. 자세에 강인한 걸음 검출을 위해 보정된 3축 가속도 값(a_x, a_y, a_z)의 크기(magnitude) 값인 a_{3D} 를 사용한다. a_{3D} 는 식 (7)과 같다.

$$a_{3D} = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2} \tag{7}$$

피크치 검출 기법과 영교차점 검출 기법은 센서의 노이즈에 민감하다. 가속도 센서 값의 노이즈로 인해 순간적인 에러 값이 발생하게 되면 잘못된 걸음을 검출할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 걸음 검출의 성능을 개선시키기 위하여 a_{3D} 값에 이동평균 필터(moving average filter)를 적용하였다. 그림 4는 이동평균 필터의 적용 전후의 데이터를 나타낸다. 필터를 적용하기 전에는 노이즈로 인해 걸음 검출 알고리즘을 적용하기가 어렵지만 필터를 적용한 후에는 피크 값과 영교차점의 검출이 용이한 신호의 형태로 바뀌게 되어 정확한 걸음 검출이 가능해진다. 걸음 검출 알고리즘의 조건은 다음과 같다.

- Max peak > max threshold & min peak < min threshold
- 현재 max/min peak와 이전 max/min peak 사이의 시간이 threshold 값 보다 작으면 더 크거나/작은 max/min peak로 업데이트
- Max peak과 min peak 발생 후 영교차점 검출

두 번째 조건은 가속도 센서의 신호가 여러 개의 피크치를 가질 경우에도 정확한 최대/최소 피크치를 찾기 위한 조건으로 정확한 보폭 추정을 위해 꼭 필요하다. 위 조건이 모두 만족하면 영교차점에서 걸음 검출이 된다. 그림 4에 최대/최소 threshold, 최대/최소 피크치, 영교차점을 통한 걸음 검출의 예가 나타나 있다. 영교차점을 중력가속도 값인 $1g(9.81m/s^2)$ 로 두고 검출하였다.

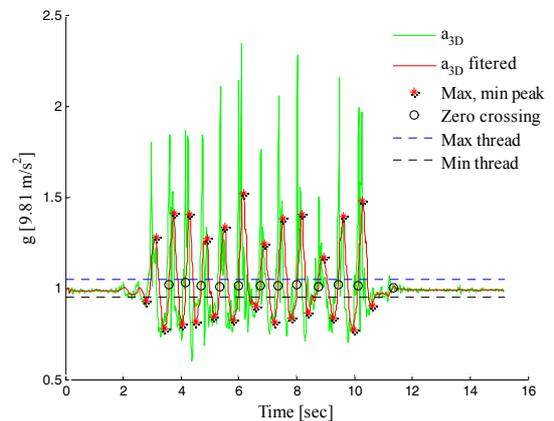


그림 4. 필터링된 가속도 신호 사용한 걸음 검출.
Fig. 4. Step detection using filtered acceleration signal.

2. 보폭 추정

보폭이란 걸음을 걸을 때 앞발 뒤축에서 뒷발 뒤축까지의 거리이다. 걸음 검출 후, 각 걸음과 걸음 사이의 보폭을 추정을 통한 이동거리를 구해야 한다. 가속도 센서를 이용한 보폭 추정 기법은 선형 모델[13], 역진자형 모델[14], 비선형 모델(경험적 모델)[15], 인공신경망(ANN: Artificial Neural Network) 모델 [16]과 같이 다양한 기법이 존재한다. 네 가지 방식 보폭 추정에 있어서 비슷한 성능을 보여주기 때문에 본 논문에서는 구현이 쉽고 보폭 추정 파라미터가 하나인 비선형 모델을 적용하여 보폭을 추정하였다[17].

보폭 추정을 위한 비선형 모델의 식은 다음과 같다[15].

$$SL = K \cdot \sqrt{a_{3D_{max}} - a_{3D_{min}}} \quad (8)$$

SL은 보폭(step length), K는 보폭 결정 상수, $a_{3D_{max}}$ 는 한 걸음에서 발생하는 최대 가속도 값, $a_{3D_{min}}$ 은 최소 가속도 값이다. 보폭 결정 상수 K는 미리 실험을 통하여 구하여야 하는 값으로 보행자의 다리 길이에 따라 달라진다. 하지만 일반적으로 성인의 보폭 크기는 0.65 m내외 이다. 이러한 일반적인 통계를 이용하여 보폭을 간단하게 상수로 설정할 수 있다. 보폭 추정에 있어서 K값은 영향이 크지 않으므로 고정해도 크게 문제가 되지 않지만 더 정확한 보폭을 추정하기 위해서는 각 사람마다 실험을 통하여 K값을 구하여 적용하면 된다[11]. 최대/최소 가속도 값은 걸음 검출에서의 최대/최소 피크치 값을 사용한다.

3. 자세 및 방향각 추정

3.1 자세 추정

IMU로부터 자세 및 방향각을 추정하는 가장 간단한 방법은 자이로 센서 각속도 값의 적분이다. 자이로 센서는 동체의 각속도를 측정하는 장치이기 때문에 IMU의 움직임에 따라 동체 좌표계가 변하게 된다. 따라서 IMU의 항법 좌표계(navigation frame)와 동체 좌표계(body frame) 사이의 회전에 대한 좌표변환이 필요하다. 좌표변환 행렬을 구하기 위한 자세 계산 알고리즘으로 오일러각(Euler angle)을 이용하였다. 오일러각은 3차원 공간에서 물체의 방위를 표시하기 위한 3개 각도인 Roll(ϕ), Pitch(θ), Yaw(ψ)의 조합으로 물리적으로 이해하기 쉽기 때문에 자세 계산에 많이 사용되고 있다. 각속도를 오일러각으로 변환하는 변환 행렬은 다음 식 (9)와 같다.

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{C}^{-1}\boldsymbol{\omega} \quad (9)$$

여기서

$$\mathbf{x} = [\phi \ \theta \ \psi]^T, \quad \boldsymbol{\omega} = [\omega_x \ \omega_y \ \omega_z]^T,$$

$$\mathbf{C}^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & \sin\phi \tan\theta & \cos\phi \tan\theta \\ 0 & \cos\phi & -\sin\phi \\ 0 & \sin\phi \sec\theta & \cos\phi \sec\theta \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \sin\phi \tan\theta & \cos\phi \tan\theta \\ 0 & \cos\phi & -\sin\phi \\ 0 & \sin\phi \sec\theta & \cos\phi \sec\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix}$$

$\dot{\mathbf{x}}$ 은 오일러각 변화량, \mathbf{C}^{-1} 은 각속도를 오일러각으로 변환하기 위한 행렬, $\boldsymbol{\omega}$ 는 자이로에서 측정한 각속도를 나타낸다.

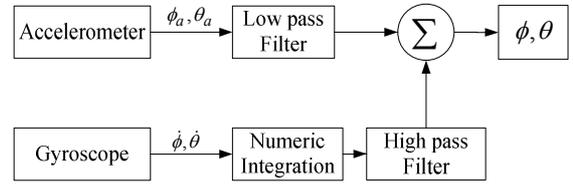


그림 5. 1차 상보 필터를 이용한 센서 융합 알고리즘.
Fig. 5. Sensor fusion algorithm using the complementary filter.

자이로만을 이용한 자세 측정은 시간에 따라 누적오차가 발생한다. Roll과 Pitch의 경우 가속도 센서와 자이로 센서 융합을 통하여 누적 오차를 제거할 수 있다. 가속도 센서의 출력 값과 오일러각과의 관계는 식 (10)과 같다.

$$\phi_a = \tan^{-1}\left(\frac{a_y}{a_z}\right) \quad (10a)$$

$$\theta_a = \sin^{-1}\left(\frac{a_x}{\sqrt{a_y^2 + a_z^2}}\right) \quad (10b)$$

여기서 ϕ_a 와 θ_a 는 가속도 센서로부터 측정된 Roll과 Pitch각이다. 가속도 센서와 자이로 센서의 Roll과 Pitch축 융합 알고리즘은 1차 상보 필터를 사용하였다[18]. 1차 상보 필터는 구현이 간단하면서도 우수한 성능을 낸다. 그림 5는 1차 상보 필터의 블록 다이어그램이다.

1차 상보필터는 가속도에 저역통과필터(low pass filter)를 사용하고, 자이로 센서에는 고역통과필터(high pass filter)를 사용한다. 각도를 얻는데 있어서 가속도 센서는 steady state 일 때 특성이 좋고, 자이로 센서는 고주파 특성에 우수한 특성을 가지기 때문에 두 센서를 융합하면 누적오차가 없고 정확한 각도가 얻어진다.

3.2 방향각 추정

일반적으로 Yaw각은 지자기 센서와 융합을 통하여 자이로 센서의 누적 오차를 제거한다. 하지만 실내환경에서는 외부 자계의 영향을 많이 받기 때문에 지자기 센서의 사용이 어렵다. 자이로 센서만을 사용한 Yaw각 측정은 지속적인 누적오차를 발생시키기 때문에 이를 보정해주어야 한다. 따라서 본 논문에서는 자이로의 누적오차를 최소화 하기 위해 III 장에서의 온도보상과 센서 보정을 통해 자이로 바이어스의 오차를 최소화 하였다. 또한 자이로 센서의 크기 값을 이용하여 누적화 오차를 최소화 시키는 방법을 제안한다. 식 (11)은 자이로 센서의 크기 값, ω_{3D} 을 나타낸 것이다.

$$\omega_{3D} = \sqrt{\omega_x^2 + \omega_y^2 + \omega_z^2} \quad (11)$$

자이로 센서는 움직임이 없는 상태에서 각속도 값이 0이다. 하지만 노이즈와 바이어스에 의해 0이 아닌 값을 가지게 된다. 정지상태에서 ω_{3D} 값이 특정 임계값(threshold)보다 낮을 경우 이를 정지상태로 가정하면 이 때 발생하는 노이즈로 인한 누적오차와 보정되지 못한 추가적인 바이어스를 제거할 수 있다. 정지상태에 대한 조건을 식 (12)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\omega_{3D} < \Omega_{\omega_{3D}} \ \& \ \Delta t_{\omega} > \Omega_{\omega} \quad (12)$$

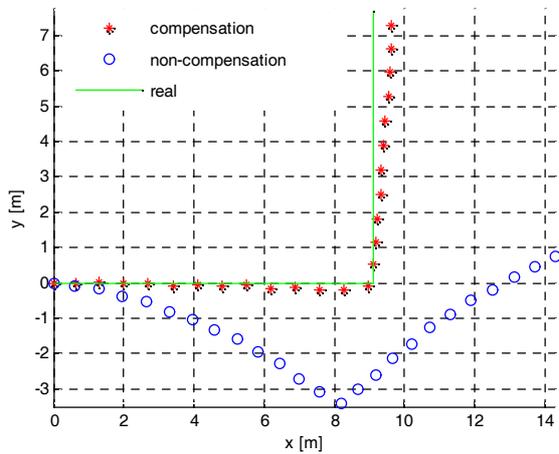


그림 6. 자이로 센서 보정 전후 위치 추정 비교.
Fig. 6. Position comparison before and after calibration of gyro.

$\Omega_{\omega_{3D}}$ 는 정지상태에서의 ω_{3D} 의 임계값, Δt_{ω} 는 앞 조건이 참일 때부터 경과한 시간, Ω_{ω} 는 시간 임계값 이다. 3D 각속도 값이 임계값 보다 작고, 시간 경과가 Ω_{ω} 보다 크면 정지상태로 가정한다. 이 때 발생하는 각속도 값은 0으로 만들고, 그 시간 동안의 각속도의 평균 값을 바이어스로 두고 이동상태에서 제거해 준다. 이때 초기 방향 설정은 최초 보행자의 위치에서 5초간의 방향 위치를 기준으로 정한다.

그림 6은 자이로 센서 보정 전후의 보행자의 위치 추정을 비교한 것이다. compensation은 센서 보정이 된 값이고 non-compensation은 보정이 안된 값이다. real은 실제 거리를 말한다. 센서가 보정이 된 경우는 방향각을 적용 하였을 경우 실제 이동 거리를 잘 찾아 가지만 센서가 보정이 되지 않은 경우를 보면 초기의 정확한 방향을 찾기 어려워 방향각이 많이 틀어 지는 것을 확인할 수 있다.

V. 실험 결과

모든 실험은 실내 환경에서 이루어 졌으며 제작한 PDR시스템 모듈을 허리에 장착하였다. 실험은 걸음 검출과 보폭추정의 분석 결과와 위치추정의 결과를 수행하였다.

1. 걸음 검출 및 보폭 추정

걸음 측정, 보폭 추정, 보폭 결정 상수에 대한 결과를 알아보기 위해 실험을 하였다. 실험 방법은 실내에서 직선 경로 14.7 m를 총 10사람이 10회씩 실험 하였으며 그 결과의 평균 값을 표 2에 나타내었다. 보폭 결정 상수 값의 결정을 위해서 센서 모듈을 허리 뒤 중앙에 장착하여 실험을 하였다. 보폭은 한 걸음마다 0.7 m이며 실제 걸음 수는 21걸음이다. 속도는 일반적인 성인의 보행 속도로 수행하였다.

실험 결과 일반적인 보행 속도에서는 측정된 걸음 수는 문제가 되지 않는다. 하지만 정밀한 보폭 추정을 하기 위해서는 각 사람마다 보폭 결정 상수가 다르게 적용 되는 것을 확인 할 수 있다. 일반적으로 한 걸음에 0.7 m의 보폭을 걸었을 경우 최적 보폭 결정 상수는 0.4-0.5를 벗어나지 않는 것을 확인 할 수 있다. 총 10사람의 최적 보폭 결정 상수 값을 평균 해보면 0.475이다. 이 평균에서 가장 많이 차이 나는 사람 4와 사람 7에 적용 하였을 경우의 결과는 표 3과 같다.

표 2. 최적 K값을 이용한 걸음 검출 및 보폭추정 결과.

Table 2. The results of step detection and step length estimation using the Optimal K.

| 실험자 | 보폭 결정 상수 K | 측정된 걸음 수 | 평균 보폭 (m) | 이동 거리 (m) | 거리 오차 (m) |
|------|------------|----------|-----------|-----------|-----------|
| 사람1 | 0.473 | 21 | 0.7029 | 14.8308 | 0.1308 |
| 사람2 | 0.495 | 21 | 0.7021 | 14.7431 | 0.0431 |
| 사람3 | 0.48 | 21 | 0.7029 | 14.7601 | 0.0601 |
| 사람4 | 0.435 | 21 | 0.7018 | 14.7384 | 0.0384 |
| 사람5 | 0.492 | 21 | 0.7021 | 14.7451 | 0.0451 |
| 사람6 | 0.487 | 21 | 0.7011 | 14.6523 | 0.0477 |
| 사람7 | 0.5 | 21 | 0.7058 | 14.8224 | 0.1224 |
| 사람8 | 0.481 | 21 | 0.7033 | 14.7703 | 0.0703 |
| 사람9 | 0.462 | 21 | 0.7090 | 14.8883 | 0.1883 |
| 사람10 | 0.445 | 21 | 0.7025 | 14.7523 | 0.0523 |

표 3. 고정된 K값을 이용한 걸음 검출 및 보폭 추정 결과.

Table 3. The results of step detection and step length estimation using the Fixed K.

| 실험자 | 보폭 결정 상수 K | 측정된 걸음 수 | 평균 보폭 (m) | 이동 거리 (m) | 거리 오차 (m) |
|-----|------------|----------|-----------|-----------|-----------|
| 사람4 | 0.475 | 21 | 0.7639 | 16.0409 | 1.3409 |
| 사람7 | 0.475 | 21 | 0.6705 | 14.0813 | -0.6187 |

표 3의 결과에서 사람4의 경우와 같이 최적 보폭 결정 상수가 아닌 경우 최대 거리 오차가 1.3 m로서 최대 9%의 오차까지 나타났다. 사람4의 경우는 다리 길이가 1.08 m에 키가 185 cm의 장신의 사람이다. 일반적으로 보폭 상수의 영향이 작지만 다리 길이에 따라서 보폭 결정상수가 어느 정도 영향을 많이 미치는 것을 볼 수 있다. 만약 센서 모듈을 허리 왼쪽이나 허리 오른쪽에 부착할 경우 같은 사람의 경우에서도 보폭 결정상수 값이 달라지지만 그 변화가 크지는 않다.

표 4는 센서 모듈의 장착 위치와 속도에 따른 실험 결과를 나타낸 것이다. 실험 방법은 실내에서 직선 경로 14.7 m를 걸음당 0.7 m 보폭을 걸어서 허리 중앙, 허리 왼쪽, 허리 오른쪽에 모듈을 부착 하여 느린 걸음, 보통 걸음, 빠른 걸음을 각 10회씩 실험한 후 평균 값을 나타내었다. 여기서 느린 걸음은 1초에 한 걸음, 보통 걸음은 일반적인 성인의 보행속도, 빠른 걸음은 경보 수준의 걸음으로 정의하여 실험하였다. 보

표 4. 센서 모듈의 위치와 속도에 따른 걸음 검출 및 보폭 추정 결과.

Table 4. The results of step detection and step length estimation according to the position and velocity of sensor module.

| 장착 위치 (허리) | 걸음 속도 | 측정된 걸음 수 | 평균 보폭 (m) | 이동 거리 (m) | 거리 오차 (m) |
|------------|-------|----------|-----------|-----------|-----------|
| 왼쪽 | 느림 | 20 | 0.5792 | 11.5866 | -3.1134 |
| | 보통 | 21 | 0.7209 | 15.1373 | 0.4373 |
| | 빠름 | 21.5 | 0.7440 | 15.9929 | 1.2929 |
| 중앙 | 느림 | 21 | 0.6191 | 12.8156 | -1.8844 |
| | 보통 | 21 | 0.7053 | 14.8114 | 0.1114 |
| | 빠름 | 21 | 0.7712 | 16.1953 | 1.4953 |
| 오른쪽 | 느림 | 20 | 0.5911 | 11.8234 | -2.8766 |
| | 보통 | 21 | 0.7336 | 15.4049 | 0.7049 |
| | 빠름 | 21 | 0.7572 | 15.9008 | 1.2008 |

폭 결정 상수 K값은 0.473으로 고정하여 실험을 진행하였다.

실험 결과, 오른쪽이나 왼쪽에 센서 모듈이 장착 된 경우 특히 느린 걸음을 걸었을 경우 걸음 수 측정이 부정확한 결과가 나타나는 것을 볼 수 있다. 때문에 최대 21 %의 오차를 보이는 것을 확인 할 수 있다. 걸음 수 측정이 정확히 된다고 하여도 16 %의 오차율이 나타나기 때문에 정확한 위치 추정이 불가능하다. 하지만 센서 모듈을 허리 어떤 곳에 장착 되어 있어도 보통 걸음일 경우는 걸음 수 측정이 정확히 되고 거리 오차도 최소 0.76 %에서 최대 4.8 %내로 비교적 우수한 성능을 확인 할 수 있었다. 가장 우수한 경우는 센서를 중앙에 장착하고 보통 걸음 일 때 가장 안정적인 센서 출력 값과 오차율이 가장 적은 것을 확인 할 수 있다.

여기서 오차의 요인은 크게 두 가지로 볼 수 있다. 첫 번째 센서모듈의 위치가 중앙이 아닌 왼쪽이나 오른쪽으로 갈수록 가속도출력 값의 크기가 차이가 나서 걸음 검출이 잘못 되는 현상이 발생하기 때문이다. 가령 오른쪽에 센서모듈을 달았을 경우 오른발을 걷게 되면 가속도 출력 값의 크기가 크게 나타나고 반대로 왼발을 걷게 되면 가속도 출력 값의 크기가 훨씬 작게 나타나므로 걸음 검출에 문제가 생겨 오차가 발생하게 된다. 두 번째 같은 사람이라도 걸음 속도에 따라 보폭 결정 상수 K값이 달라지기 때문이다. 센서 모듈을 어느 곳에 부착을 하든지 보통 걸음으로 걸었을 경우 평균 보폭의 오차율이 적게 나타난다. 이는 보통 걸음에서는 보폭 결정 상수의 영향이 작은 것을 확인 할 수 있다. 하지만 센서 모듈을 허리 중앙에 장착 한 경우에서 보여 주듯이 걸음 속도에 따라 추정된 보폭의 오차가 발생하는 것을 확인 할 수 있다. 이는 같은 사람이라도 보폭 결정 상수 K값에 영향을 받는다는 것을 보여준다. 가령 센서를 중앙에 장착한 경우 각 걸음 속도에 대한 최적의 보폭 결정 상수 K값은 느린 걸음의 K값은 0.54였고 빠른 걸음의 K값은 0.425였다.

2. 위치 추정

IV 장의 보행자 관성 항법 시스템의 위치 성능을 확인하기 위하여 보행 실험을 수행하였다. V 장의 걸음 검출 및 보폭 추정 에서의 결과를 반영하여 보폭 결정 상수 K값은 최적 값을 실험을 통하여 선정하였고 허리 중앙에 장착하여 보통

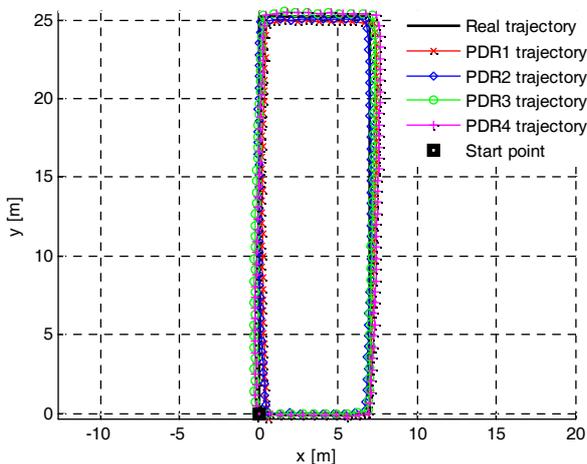


그림 7. 위치 추정 결과.
Fig. 7. Positioning result.

표 5. 위치 오차.

Table 5. Positioning errors.

| 거리 오차 (m) | 거리 오차 (%) | 평균 RMS 위치 오차 (m) | 평균 RMS 위치오차 (%) |
|-----------|-----------|------------------|-----------------|
| 0.59 | 0.95 | 1.16 | 1.87 |

걸음을 걸어 실험을 수행하였다. 각각의 실험은 최초 시작위치에서 끝나는 위치 사이의 RMS (Root Mean Square) 오차를 분석 하였다. 실험 모두 동일한 형태로 10회 수행하였다.

실험은 25.2 m x 7 m의 사각형 형태의 보행 실험을 하였다. 그림 7과 표 3은 위치 추정 결과와 위치 추정 오차를 나타낸다. 10번 실험결과 평균 거리 오차가 1 %이내, 위치 오차가 2 %이내로 매우 우수한 성능을 보였다. 상대적으로 고가의 센서를 쓴 기존 방식들[4,5]의 경우 약 2 %의 위치 오차율과 비교하였을 때, 저가의 센서를 사용하였음에도 고가 센서와 비슷한 성능을 얻을 수 있음을 확인할 수 있다.

VI. 결론

본 논문에서는 보행자 관성항법 시스템의 성능향상을 위하여 보정기법과 PDR 기법을 사용하는 알고리즘을 제시하였다. IMU 센서 모델링을 기반으로 가속도 및 자이로 센서 보정과 온도보상을 통해 신뢰성이 있는 센서 정보를 얻을 수 있었다. 또한, 허리에 장착한 보행자 관성항법 시스템에서 사용되는 걸음 검출, 보폭 추정, 자세 및 방향각 추정 알고리즘을 적용된 PDR 기법을 개발하여 걸음 검출 성능을 향상 시켰고, 자이로 센서를 이용하여 방향각 누적오차를 최소화 하였다. 본 연구에서 제안된 기법들은 실험을 통해 그 성능을 검증하였다. 실험 결과 거리 오차 1% 이내, RMS 위치오차 3% 이내의 뛰어난 성능을 보여주었다. 추후 높이추정기법, 옆 걸음이나 계단 보행과 같은 특수한 걸음에 대한 걸음 검출 및 보폭 추정 알고리즘을 개발을 통해 실생활에 널리 사용될 수 있는 보행자 관성 항법 시스템 개발을 할 것이다.

REFERENCES

- [1] S. H. Fang and T. N. Lin, "Principal component localization in indoor WLAN environments," *IEEE Trans. on Mobile Computing*, vol. 11, no. 1, pp. 100-110, Jan. 2012.
- [2] Y. Zhou, C. L. Law, Y. L. Guan, and F. Chin, "Indoor elliptical localization based on asynchronous UWB range measurement," *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*, vol. 60, no. 1, pp. 248-257, Jan. 2011.
- [3] J. Park and J. Lee, "A beacon color code scheduling for the localization of multiple robots," *IEEE Trans. on Industrial Informatics*, vol. 7, no. 3, pp. 467-475, Aug. 2011.
- [4] C. Huang, Z. Liao, and L. Zhao, "Synergism of INS and PDR in self-contained pedestrian tracking with a miniature sensor module," *IEEE Sensors Journal*, vol. 10, no. 8, pp. 1349-1359, Aug. 2010.
- [5] J. Borenstein, L. Ojeda, and S. Kwanmuang, "Heuristic reduction of gyro drift for personnel tracking systems," *The Journal of Navigation*, vol. 62, no. 1, pp. 41-58, Jan. 2009.
- [6] S. H. Shin, C. G. Park, and S. Choi, "New map-matching algorithm using virtual track for pedestrian dead reckoning," *ETRI Journal*, vol. 32, no. 6, pp. 891-900, Dec. 2010.

- [7] I. Skog, P. Handel, J. O. Nilsson, and J. Rantakokko, "Zero-Velocity detection—an algorithm evaluation," *IEEE Trans. on Biomedical Engineering*, vol. 57, no. 11, pp. 2657-2666, Nov. 2010.
- [8] D. Alvarez, R. C. González, A. López, and J. C. Alvarez, "Comparison of step length estimators from wearable accelerometer devices," *Engineering in Medicine and Biology Society, 2006. EMBS '06. 28th Annual International Conference of the IEEE*, pp. 5964-5967, Nov. 2006.
- [9] J. Y. Kim and S. Y. Lee, "Estimation of the user's location/posture for mobile augmented reality," *Journal of Institute of Control Robotics and Systems (in Korean)*, pp. 1011-1017, Nov. 2012.
- [10] D. Alvarez, R. C. Gonzalez, A. Lopez, and J. C. Alvarez, "Comparison of step length estimators from wearable accelerometer devices," *Proc. of the 28th IEEE EMBS Annual International Conference*, pp. 5964-5967, Aug. 2006.
- [11] W. Chen, "An effective pedestrian dead reckoning algorithm using a unified heading error model," *Position Location and Navigation Symposium*, pp. 340-347, May 2010.
- [12] L. Fang, P. Antsaklis, L. Montestruque, M. McMickell, M. Lemmon, Y. Sun, H. Fang, I. Koutroulis, M. Haenggi, M. Xie, and X. Xie, "Design of a wireless assisted pedestrian dead reckoning system - the NavMote experience," *IEEE Trans. Inst. and Meas.*, vol. 54, no. 6, pp. 2342-2358, 2005.
- [13] Q. Ladetto, "On foot navigation: continuous step calibration using both complementary recursive prediction and adaptive Kalman filtering," *Proc. of ION GPS 2000*, pp. 1735-1740, Sep. 2000.
- [14] W. Zijlstra and A. L. Hof, "Displacement of the pelvis during human walking: experimental data and model predictions," *Gait & Posture*, vol. 6, no. 3, p. 249, 1997.
- [15] H. Weinberg, "Using the adxl202 in pedometer and personal navigation applications," *Application Notes, American Devices*, 2002.
- [16] S. Cho and C. Park, "MEMS based pedestrian navigation system," *The Journal of Navigation*, vol. 59, pp. 135-153, 2006.
- [17] S. P. Tseng, W. L. Li, C. Y. Sheng, J. W. Hsu, and C. S. Chen, "Motion and attitude estimation using inertial measurements with complementary filter," *Proc. of 2011 8th Asian Control Conference(ASCC)*, May 2011.
- [18] H. G. Min, J. H. Yoon, J. H. Kim, S.-H. Kwon, and E. T. Jeung, "Design of complementary filter using least square method," *Journal of Institute of Control Robotics and Systems (in Korean)*, pp. 125-130, Feb. 2011.



김 윤 기

2011년 경남과학기술대학교 메카트로닉스공학과(공학사). 2013년 부산대학교 전자전기공학과(공학석사). 2013년~현재 부산대학교 대학원 전자전기공학 박사과정 재학중. 관심분야는 이족로봇제어, SLAM, Navigation and localization 시스템, Haptics.



박 재 현

2008년 동의대학교 컴퓨터공학과(공학사). 2012년 부산대학교 전자전기공학과(공학박사). 관심분야는 Haptics, 이족로봇제어, Navigation and localization 시스템.



곽 휘 권

2005년 충남대학교 전자공학과(공학사). 2007년 충남대학교 전자공학과(공학석사). 2011년 충남대학교 전자공학과(공학박사). 2010년~현재 삼성탈레스 전문연구원. 관심분야는 항법시스템, 로봇공학.



박 상 훈

2001년 강원대학교 정보통신공학과(공학사). 2003년 강원대학교 컴퓨터정보통신공학과(공학석사). 2008년 광주과학기술원 정보통신공학과(공학박사). 2006년~2007년 노스캐롤라이나 주립대학교 컴퓨터공학과 방문연구원. 2012년~현재 삼성탈레스 전문연구원. 관심분야는 멀티미디어 스트리밍, 웨어러블 컴퓨팅.



이 춘 우

1990년 경북대학교 전자공학과(공학사). 1992년 경북대학교 전자공학과(공학석사). 2000년~현재 삼성탈레스 수석연구원. 관심분야는 항법시스템, 무인화시스템, 로봇공학.



이 장 명

1980년 서울대학교 전자공학과(공학사). 1982년 서울대학교 전기공학과(공학석사). 1990년 University of southern California(공학박사). 1993년~현재 부산대학교 전자전기공학부 교수. 관심분야는 특수 환경 Localization 및 Navigation, 마이크로 프로세서 응용, 지능로봇 시스템 제어.