신발에 IMU 를 장착한 PNS 에서 방위각 편차의 영향 분석

An Analysis of the Heading Bias Effects in PNS using IMUs Attached to Shoes

김 상 식, 이 연 규, 박 찬 식*
(SangSik Kim¹, YearnGui Yi¹, and Chansik Park²)

¹Dept. of Control and Robotics Eng., Chungbuk National University

²Dept. of Control and Robotics Eng., Research Institute of Computer Information and Communication, Chungbuk National University

Abstract: Heading bias effects in PNS using IMUs attached to shoes are analyzed in this paper. The navigation algorithms of a single foot PNS where one IMU is attached to a foot and dual foot PNSs where two IMUs are attached to each foot are derived. Two navigation algorithms are proposed for the dual foot PNS: 1) the positions from the independent right and left foot PNSs are averaged to provide the final position, 2) the right and left foot PNSs are correlated and it provides positions of each foot. Furthermore, it is proven that two methods are equal. Using the derived navigation algorithms the effect of heading bias caused by a misalignment of the moving direction and IMU is analyzed. The analysis explains the position error of a single foot PNS is diverged while the heading bias is effectively compensated in dual foot PNSs because of the symmetry of heading biases. The experimental results confirm the analysis.

Keywords: PNS, IMU, heading bias, dual foot PNS

1. 서론

현재 사용자 혹은 이동체의 위치를 구하는 방법으로 GNSS (Global Navigation Satellite System)가 주로 사용된다. GNSS는 통신기술과 소자의 발달로 위치 정확도가 비약적으로 향상되었지만 건물 안이나 지하와 같이 위성신호 수신에 제약받는 지역에서는 적용이 불가능하다는 단점이 있다[1].

GNSS가 적용되기 어려운 실내에서 사용자의 위치를 구하는 대표적인 방법으로는 가속도계와 자이로스코프를 이용하는 INS (Inertial Navigation System)가 있다. INS를 이용한 측위 방법은 가속도계로 얻은 속도를 적분하여 거리를 구하고 자이로스코프로 이동방향을 측정하여 이전위치로부터 현재 위치를 추측하게 된다. 하지만 이러한 방법은 시간이 지날수록 누적 오차가 발생하며 사용한 센서 성능이 위치 정확도에 많은 영향을 미치는 단점이 있다[2].

INS와 유사한 방법으로 사람의 보행 정보를 이용한 PNS (Personal Navigation System)가 있다. 저가형 관성 센서의 누적 오차를 줄이기 위하여 PNS에서는 보행 시 발생하는 가속도계 출력 변화를 감지하여 걸음을 검출하고 여기에 보폭을 곱해 이동 거리를 계산한다. 동시에 자이로스코프의 각속도 측정치를 이용하여 이동 방향을 결정한다. 추가적으로 절대 방위각을 알 수 있는 지자기 센서를 자이로스코프와 결합시켜 이동 방향에 대한 정확도를 높일 수도 있다[2].

MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 기술의 발달로 관성센서들이 성능은 향상되고 동시에 소형, 저가형으로 개발되고 있다. 특히 3축 자이로스코프, 가속도계, 지자기 센서가 하나로 통합된 IMU (Inertial Measurement Unit)가 출시되어 사용이 간편해졌다.

현재 PNS 연구에 MEMS 기반 IMU가 많이 사용되며 크기가 손가락 한마디 정도인 IMU는 신발이나, 옷, 허리띠에 자연스러운 부착이 가능하다. 따라서 3축 관성센서들을 이용하여 노약자나 환자의 관리, 낙상 검출, 보행 특성 분석과 같은 의료 분야에 PNS를 적용하고자 하는 연구[3]가 활발히 진행되고 있다.

PNS에서 걸음 검출기법과 방위각 보상기법은 성능에 많은 영향을 주므로 여기에 대한 많은 연구가 진행되어 왔다. 대부분의 PNS는 환자의 가슴이나 허리에 IMU를 부착하는 형태로 사용해 왔는데 이 방법은 간단한 걸음 검출기법만으로도 걸음을 검출할 수 있으나 IMU를 부착하는 위치와 사람마다 신체구조가 다른 특성으로 인하여 걸음과 방위각 추정이 어려운 단점이 있다[4]. 최근에는 소형화된 IMU의 이점을 활용함과 동시에 신체구조의 다양성을 최소화할 수 있는 해결책으로서 IMU를 신발에 부착하는 방법이 시도되고 있다[1-3,5-12]. 신발에 부착된 IMU를 이용하면 걸음 검출 외에 사람의 보행특성을 파악할 수 있으며, 특히 걸음에서 발이 신체를 지지하고 있는 구간특성을 인지함으로써 발이 지면과 접촉하고 있는 지지기 영역을 찾아 보다 안정적으로 방위각을 결정할 수 있다[1].

IMU를 신발에 장착하는 PNS에서 보행자의 보행 특성에 따라 이동방향과 발이 향하는 방향의 차이인 방위각 편차의 발생은 필수적이라고 할 수 있다. 그러나 지금까지의 연구는 주로 한쪽 신발에 IMU를 부착한 연구가 진행되어 왔으며 이

* 책임저자(Corresponding Author)

Manuscript received May 9, 2013 / revised August 2, 2013 / accepted August 20, 2013

김상식, 이연규: 충북대학교 제어로봇학과

(hosasy49@cbnu.ac.kr/hobii@nate.com)

박찬식: 충북대학교 제어로봇학과, 충북대학교 컴퓨터 정보통신연구소

(chansp@cbnu.ac.kr)

※ 이 연구는 2012년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

러한 한발 PNS에서는 방위각 편차의 영향을 무시하거나 진행방향과 발을 일치시켜 실험하여 그 영향을 최소화하였다 [1-3,9-12]. 그러나 방위각 편차는 센서에서 측정되는 측정 잡음에 비해 큰 바이어스로 나타나므로 신발에 IMU를 장착하는 경우 이에 대한 보상이 반드시 필요하다.

본 논문에서는 먼저 한쪽 신발에 부착된 IMU를 이용한 한발 PNS 알고리즘을 제시하고 방위각 편차가 미치는 영향을 분석하였다. 추가로 양발에 IMU가 부착되는 양발 PNS 알고리즘을 제시하고 방위각 편차의 영향을 분석하였다. 방위각 편차 영향분석 결과 얻어진 양발 PNS가 방위각 편차의 영향이 더 적다는 장점을 얻었으며 이를 실험을 통해 검증하였다. 실제 실험 결과와 비교하여 제시한 영향 분석의 타당성을 확인하였다.

II. 신발에 IMU가 장착된 PNS 항법 알고리즘

그림 1에 직선 경로를 따라 이동하는 왼발과 오른발의 궤적을 나타내었다. 그림에서 $(x_*(0), y_*(0))$ 는 초기 위치, $(x_*(k), y_*(k))$ 는 k번째 걸음에서의 위치, $\theta_*(k)$ 는 측정된 방위각, $\Delta\theta_*(k)$ 는 방위각 편차를 나타낸다. 여기서 하첨자 R은 오른발, L은 왼발을 각각 나타낸다. 또한 $d_{LL}(k), d_{RR}(k)$ 는 왼발에서 왼발, 오른발에서 오른발까지의 보폭, $d_{RL}(k), d_{LR}(k)$ 는 오른발에서 왼발, 왼발에서 오른발까지의 보폭, $\theta_r(k)$ 는 이동 방향을 나타낸다.

1. 한발 PNS

왼발에 IMU가 부착된 한발 PNS에서 현재 위치는 다음과 같이 구할 수 있다. 오른발도 같은 방법으로 구할 수 있으며 여기서는 왼발 PNS만 나타내었다.

$$\begin{aligned} x_L(k) &= x_L(k-1) + d_{LL}(k) \cdot \sin \theta_L(k) \\ y_L(k) &= y_L(k-1) + d_{LL}(k) \cdot \cos \theta_L(k) \end{aligned} \quad (1)$$

현재 위치 $(x_L(k), y_L(k))$ 는 직전 위치 $(x_L(k-1), y_L(k-1))$ 에 보폭에 해당하는 이동 거리를 x 축과 y 축 성분으로 분리하여 구한 변화량을 더해 구한다. 따라서 현재 위치의 정확

그림 1. 발 이동 궤적.

Fig. 1. Trajectory of foot movement.

도는 직전 위치, 보폭 및 방위각의 정확도에 따라 결정된다.

일반적으로 보폭은 걸음에 따라 큰 변화가 없다고 가정하고 일정한 값으로 두지만 정확한 값을 요구하는 경우 가속도계 출력을 적분하는 방법을 사용한다[5]. 여기서는 구현의 편의성과 보행시 가속도계의 수평 유지가 어려워 적분 결과에 오차가 포함될 수 있으므로 보폭을 일정한 값으로 두는 방법을 사용했다.

현재까지 널리 알려진 걸음 검출 기법으로 피크치 검출 기법, 일정 구간 검출 기법, 영교차 검출 기법이 알려져 있다 [2]. 피크치 검출 기법은 보행시 충격에 의해 생기는 가속도의 정점을 감지하여 걸음을 검출하며, 일정 구간 검출 기법은 가속도계의 신호가 일정한 특성을 보이는 구간을 검출하며, 영교차 검출 기법은 보행시 가속도계 출력이 바뀌는 지점을 검출한다. 이 외에도 걸음과 보폭을 동시에 결정하기 위한 방법으로 발 운동학적 모델에 따라 가속도계를 적분하여 보폭을 결정하는 ZUPT (Zero velocity UPdaTe)이 알려져 있다 [1-3]. 여기서는 이전 논문에서 제안한 보행패턴에 따른 가속도계 출력의 변곡점을 확인한 후 지지기 영역을 감지하여 정확한 걸음을 검출하는 알고리즘을 사용하였다[6].

이동방향은 자이로스코프와 지자기 센서의 출력을 결합시켜 얻은 방위각을 사용하며 이는 자북을 기준으로 하는 절대 방위각을 나타낸다. IMU가 발에 부착된 경우 가속도계를 이용하여 정확한 걸음 검출을 위해 많은 연구가 진행된 것에 비하여 정확한 방위각을 검출하는 연구는 아직 많이 진행되어 있지 않다.

한발 PNS는 구현의 단순함은 있지만, 방위각 편차의 영향이 누적되어 나타나며 보폭으로 한 걸음을 이용하므로 반 걸음을 검출할 수 없으며 개인의 특성에 따른 왼발과 오른발의 보폭 차이를 고려하지 못한다.

2. 양발 PNS

양쪽 신발에 IMU를 부착시킨 양발 PNS에서 현재 위치는 다음 두 가지 방법으로 구할 수 있다.

방법 1: 현재 위치를 왼발과 오른발 위치의 평균으로 구한다.

$$x_m(k) = \frac{x_L(k) + x_R(k)}{2}, \quad y_m(k) = \frac{y_L(k) + y_R(k)}{2} \quad (2)$$

여기서 $(x_L(k), y_L(k)), (x_R(k), y_R(k))$ 는 식 (1)로 구한 왼발과 오른발 PNS의 결과이다. 방법 1은 한발 PNS를 확장하여 쉽게 사용할 수 있다.

방법 2: 왼발과 오른발 위치를 교대 구하여 최종 위치를 결정한다. 왼발의 직전 위치는 오른발이, 오른발의 직전 위치는 왼발이 된다.

왼발을 먼저 걷기 시작하는 경우 현재 위치는 다음과 같다.

$$x_R(2n) = x_L(2n-1) + d_{LR}(2n) \cdot \sin \theta_R(2n) \quad (3)$$

$$y_R(2n) = y_L(2n-1) + d_{LR}(2n) \cdot \cos \theta_R(2n)$$

$$x_L(2n-1) = x_R(2n-2) + d_{RL}(2n-1) \cdot \sin \theta_L(2n-1) \quad (4)$$

$$y_L(2n-1) = y_R(2n-2) + d_{RL}(2n-1) \cdot \cos \theta_L(2n-1)$$

식 (3)에서 현재 위치 $(x_R(2n), y_R(2n))$ 는 직전 위치 $(x_L(2n-1), y_L(2n-1))$ 에 왼발에서 오른발까지의 보폭 $d_{LR}(2n)$ 과

이 때의 방위각 $\theta_r(2n)$ 을 이용하여 계산한다. 양발 PNS 방법 1에서 왼발과 오른발의 평균을 나타내는 걸음 수 k 와 방법 2에서 왼발과 오른발의 각각의 걸음을 나타내는 걸음 수 n 는 $k = 2n$ 의 관계를 갖는다. 식 (5)는 왼발을 먼저 걸은 경우이며 오른발이 도착한 위치는 왼발과 오른발의 위치 평균을 사용한 방법 1의 위치와 같다. 이에 대한 증명은 III 장에 나타내었다. 반대로 오른발을 먼저 걸은 경우는 식 (6)과 같다.

$$x_m(k) = x_r(2n), \quad y_m(k) = y_r(2n) \quad (5)$$

$$x_m(k) = x_l(2n), \quad y_m(k) = y_l(2n) \quad (6)$$

III. 방위각 편차의 영향

1. 한발 PNS

그림 2에 한발 PNS에서 보행 특성에 따른 방위각 오차의 영향을 나타내었다. 여기서 $\theta_l(k)$ 는 측정된 방위각, $\theta_r(k)$ 는 진행방향, $\Delta\theta_l(k)$ 는 발과 진행방향의 차이로 발생하는 방위각 편차이며 IMU에서 측정된 방위각은 방위각 편차가 포함되어 다음과 같이 나타난다.

$$\theta_l(k) = \theta_r(k) + \Delta\theta_l(k), \quad \theta_r(k) = \theta_r(k) + \Delta\theta_r(k) \quad (7)$$

왼발 PNS의 경우 방위각 편차의 영향은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} x_l(k) &= x_l(k-1) + d_{ll}(k) \cdot \sin\{\theta_r(k) + \Delta\theta_l(k)\} \\ y_l(k) &= y_l(k-1) + d_{ll}(k) \cdot \cos\{\theta_r(k) + \Delta\theta_l(k)\} \end{aligned} \quad (8)$$

매 걸음 일정한 패턴으로 이동한다면 방위각 편차가 일정하므로 $\Delta\theta_l(k), \Delta\theta_r(k)$ 을 상수로 둘 수 있다. 표현을 간단히 하기 위하여 $C_l = \cos(\Delta\theta_l(k))$, $S_l = \sin(\Delta\theta_l(k))$ 로 두면 식 (8)은 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned} x_l(k) &= x_l(k-1) + d_{ll}(k) \cdot (C_l \sin \theta_r(k) + S_l \cos \theta_r(k)) \\ y_l(k) &= y_l(k-1) + d_{ll}(k) \cdot (C_l \cos \theta_r(k) - S_l \sin \theta_r(k)) \end{aligned} \quad (9)$$

식 (1)과 식 (9)를 비교하면 방위각 편차의 영향을 확인할 수 있다. $k=1$ 에서부터 누적된 위치는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} x_{\Sigma L}(k) &= \sum_{i=1}^k d_{ll}(i) \cdot (C_l \cdot \sin \theta_r(i) + S_l \cdot \cos \theta_r(i)) \\ y_{\Sigma L}(k) &= \sum_{i=1}^k d_{ll}(i) \cdot (C_l \cdot \cos \theta_r(i) - S_l \cdot \sin \theta_r(i)) \end{aligned} \quad (10)$$

그림 2. 한발 PNS에서 방위각 편차의 영향.

Fig. 2. Effects of a heading bias from individual walking in a single foot PNS.

여기서 $x_{\Sigma L}(k) = x_l(k) - x_l(0)$ 와 $y_{\Sigma L}(k) = y_l(k) - y_l(0)$ 는 k 번째 걸음에서의 위치를 나타낸다. 방위각 편차가 없는 경우 구할 수 있는 참값 $x_{\Sigma L, true}(k), y_{\Sigma L, true}(k)$ 은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} x_{\Sigma L, true}(k) &= \sum_{i=1}^k d_{ll}(i) \cdot \sin \theta_r(i), \\ y_{\Sigma L, true}(k) &= \sum_{i=1}^k d_{ll}(i) \cdot \cos \theta_r(i) \end{aligned} \quad (11)$$

식 (10)과 식 (11)로부터 위치 오차는 다음과 같이 나타난다.

$$\begin{aligned} \Delta x_{\Sigma L}(k) &= x_{\Sigma L, true}(k) - x_{\Sigma L}(k) \\ &= \sum_{i=1}^k d_{ll}(i) ((1 - C_l) \cdot \sin \theta_r(i) - S_l \cdot \cos \theta_r(i)) \\ \Delta y_{\Sigma L}(k) &= y_{\Sigma L, true}(k) - y_{\Sigma L}(k) \\ &= \sum_{i=1}^k d_{ll}(i) ((1 - C_l) \cdot \cos \theta_r(i) + S_l \cdot \sin \theta_r(i)) \end{aligned} \quad (12)$$

식 (12)에서 한발 PNS에서 위치 오차는 보폭 ($d_{ll}(i)$), 진행방향 ($\theta_r(i)$) 및 방위각 편차 (C_l, S_l)의 영향을 받음을 나타낸다. 여기서 만약 보폭이 일정 ($d_{ll}(i) = d, i = 1, 2, \dots, k$) 하고, 일정한 방향 ($\theta_r(i) = \theta, i = 1, 2, \dots, k$) 으로 이동한다면 식 (12)는 다음과 같이 간단한 형태로 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta x_{\Sigma L}(k) &= k \cdot d \{ (1 - C_l) \sin \theta - S_l \cos \theta \} \\ \Delta y_{\Sigma L}(k) &= k \cdot d \{ (1 - C_l) \cos \theta + S_l \sin \theta \} \end{aligned} \quad (13)$$

식 (13)은 일정한 방향을 일정한 보폭으로 걷는 경우 방위각 편차의 영향을 나타낸다. 만약 북쪽 ($\theta = 0^\circ$) 으로 움직이는 경우라면

$$\Delta x_{\Sigma L}(k) = -k \cdot d S_l, \quad \Delta y_{\Sigma L}(k) = k \cdot d (1 - C_l) \quad (14)$$

같은 방법으로 동쪽 ($\theta = 90^\circ$) 으로 움직이는 경우

$$\Delta x_{\Sigma L}(k) = k \cdot d (1 - C_l), \quad \Delta y_{\Sigma L}(k) = k \cdot d S_l \quad (15)$$

가 되며 이는 걸음 수가 증가함에 따라 방위각편차로 오차가 누적되어 발산함을 보여 준다.

2. 양발 PNS

2.1 방법 1

오른발 PNS에 대하여도 왼발과 같은 방법으로 다음의 항법알고리즘을 얻을 수 있다. 여기서 $C_r = \cos(\Delta\theta_r(k))$, $S_r = \sin(\Delta\theta_r(k))$ 를 나타낸다.

$$\begin{aligned} x_r(k) &= x_r(k-1) + d_{rr}(k) \cdot (C_r \sin \theta_r(k) + S_r \cos \theta_r(k)) \\ y_r(k) &= y_r(k-1) + d_{rr}(k) \cdot (C_r \cos \theta_r(k) - S_r \sin \theta_r(k)) \end{aligned} \quad (16)$$

그림 3에 방법 1로 구한 위치를 나타내었으며, 식 (9)의 왼발과 식 (16)의 오른발의 평균으로 구한 위치는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} x_m(k) &= x_m(k-1) + \frac{1}{2} \{ d_{ll}(k) C_l + d_{rr}(k) C_r \} \sin \theta_r(k) \\ &\quad + \frac{1}{2} \{ d_{ll}(k) S_l + d_{rr}(k) S_r \} \cos \theta_r(k) \end{aligned} \quad (17)$$

그림 3. 양발 PNS 방법 1.

Fig. 3. Dual foot PNS-1.

$$y_M(k) = y_M(k-1) + \frac{1}{2} \{d_{LL}(k)C_L + d_{RR}(k)C_R\} \cos \theta_T(k) - \frac{1}{2} \{d_{LL}(k)S_L + d_{RR}(k)S_R\} \sin \theta_T(k)$$

k 번째 걸음까지 누적된 오차는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \Delta x_{\Sigma M}(k) &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^k \{d_{LL}(i)(1-C_L) + d_{RR}(i)(1-C_R)\} \sin \theta_T(i) \\ &\quad - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^k \{d_{LL}(i)S_L + d_{RR}(i)S_R\} \cos \theta_T(i) \\ \Delta y_{\Sigma M}(k) &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^k \{d_{LL}(i)(1-C_L) + d_{RR}(i)(1-C_R)\} \cos \theta_T(i) \\ &\quad + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^k \{d_{LL}(i)S_L + d_{RR}(i)S_R\} \sin \theta_T(i) \end{aligned} \quad (18)$$

여기서 만약 오른발과 왼발의 움직임이 대칭이라면 방위각 편차를 $\Delta \theta_L(k) = -\Delta \theta_R(k)$ 로 둘 수 있으므로 다음이 성립한다.

$$\begin{aligned} C_L &= \cos(\Delta \theta_L(k)) = \cos(-\Delta \theta_R(k)) = C_R \\ S_L &= \sin(\Delta \theta_L(k)) = \sin(-\Delta \theta_R(k)) = -S_R \end{aligned} \quad (19)$$

이 경우 식 (18)은 다음과 같이 정리 할 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta x_{\Sigma M}(k) &= \frac{(1-C_L)}{2} \sum_{i=1}^k \{d_{LL}(i) + d_{RR}(i)\} \sin \theta_T(i) \\ &\quad - \frac{S_L}{2} \sum_{i=1}^k \{d_{LL}(i) - d_{RR}(i)\} \cos \theta_T(i) \\ \Delta y_{\Sigma M}(k) &= \frac{(1-C_L)}{2} \sum_{i=1}^k \{d_{LL}(i) + d_{RR}(i)\} \cos \theta_T(i) \\ &\quad + \frac{S_L}{2} \sum_{i=1}^k \{d_{LL}(i) - d_{RR}(i)\} \sin \theta_T(i) \end{aligned} \quad (20)$$

식 (20)에서 일정한 보폭 ($d_{LL}(k) = d_{RR}(k) = d$) 으로 일정한 방향 ($\theta_T(i) = \theta$) 을 움직인다면 다음과 같이 변경된다.

그림 4. 양발 PNS 방법 2.

Fig. 4. Dual foot PNS-2.

$$\begin{aligned} \Delta x_{\Sigma M}(k) &= kd(1-C_L) \sin \theta \\ \Delta y_{\Sigma M}(k) &= kd(1-C_L) \cos \theta \end{aligned} \quad (21)$$

식 (13)과 식 (21)을 비교하면 양발 PNS를 사용함으로써 한발 PNS에 비하여 x 축 방향으로는 $-k \cdot dS_L \cos \theta$, y 축 방향으로는 $k \cdot dS_L \sin \theta$ 만큼 오차가 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 특히 북쪽 ($\theta = 0^\circ$) 으로 움직이는 경우 x 축 오차가 나타나지 않으며, 동쪽 ($\theta = 90^\circ$) 으로 움직이는 경우 y 축 오차가 나타나지 않는다.

2.2 방법 2

양발 PNS 방법 2에 대하여 앞절과 같은 방법으로 $n=1$ 부터 누적된 위치 오차를 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \Delta x_{\Sigma R}(2n) &= \sum_{i=1}^n d_{LR}(2i) \{(1-C_R) \sin \theta_T(2i) - S_R \cos \theta_T(2i)\} \\ &\quad + \sum_{i=1}^n d_{RL}(2i-1) \{(1-C_L) \sin \theta_T(2i-1) - S_L \cos \theta_T(2i-1)\} \\ \Delta y_{\Sigma R}(2n) &= \sum_{i=1}^n d_{LR}(2i) \{(1-C_R) \cos \theta_T(2i) + S_R \sin \theta_T(2i)\} \\ &\quad + \sum_{i=1}^n d_{RL}(2i-1) \{(1-C_L) \cos \theta_T(2i-1) + S_L \sin \theta_T(2i-1)\} \end{aligned} \quad (22)$$

식 (22)는 위치 오차가 보폭, 진행방향 및 방위각 편차의 영향을 받음을 나타낸다. 여기서 방위각 편차가 대칭이고, 일정한 보폭 ($d_{RL}(i) = d_{LR}(i) = d_d$) 으로 일정한 방향 ($\theta_T(i) = \theta$) 을 이동한다면 식 (22)는 식 (23)의 간단한 형태로 나타난다.

$$\begin{aligned} \Delta x_{\Sigma R}(2n) &= n \cdot 2d_d(1-C_L) \sin \theta \\ \Delta y_{\Sigma R}(2n) &= n \cdot 2d_d(1-C_L) \cos \theta \end{aligned} \quad (23)$$

여기서 $d = 2d_d$ 임을 고려하면 식 (21)과 식 (23)은 같은 결과임을 알 수 있다. 즉 방법 1과 방법 2 모두 방위각 편차로부터 받은 영향은 같으며, 한발만 사용하는 경우에 비하여 오차가 줄어듦을 알 수 있다. 방법 1에서는 왼발과 오른발의 평균인 k 개의 위치를 나는데 비하여 방법 2는 왼발과 오른발 각각의 $2n$ 개의 위치를 표현 할 수 있다.

IV. 실험 및 검증

한발 PNS와 양발 PNS의 성능과 방위각 편차의 영향을 분석하기 위하여 양쪽 신발의 발등에 IMU를 부착하고 지지기의 영향이 적은 실외 주차장에서 직선 거리 21.28m를 이동하면서 얻은 측정치를 저장하였다. 저장된 측정치에 MATLAB으로 구현한 걸음검출 알고리즘과 방위각추정 알고리즘을 적용하여 걸음과 방위각을 검출하고 이동 궤적을 추정하였다. 방위각은 안정적인 값을 얻을 수 있는 지지기 영역의 평

그림 5. 측정된 왼발과 오른발의 방위각 편차.
Fig. 5. Measured right and left foot heading bias.

그림 7. 한발 PNS에서 방위각 편차를 보정한 결과.
Fig. 7. The effect of heading bias compensation in single foot PNS.

그림 6. 한발 PNS에서 방위각 편차의 영향.
Fig. 6. The effects of the heading bias in a single PNS.

균을 사용하고[6], 보폭은 실험을 통해 결정한 상수 값을 사용하였다[6,7].

그림 5에 이동방향 ($\theta_r(k)$) 을 중심으로 왼발과 오른발에서 측정된 방위각 편차 ($\theta_L(k), \theta_R(k)$) 를 나타내었다. 왼발과 오른발 모두 18걸음을 걸었으며 초기의 방위각 편차는 왼발 $\theta_L(0) = -21.196^\circ$, 오른발 $\theta_R(0) = 26.942^\circ$ 이고, 18걸음 전체에 대한 방위각 편차의 평균은 왼발 $\bar{\theta}_L = -24.474^\circ$, 오른발 $\bar{\theta}_R = 32.495^\circ$ 로 나타났다. 이는 실험자의 오른발과 왼발의 방위각 편차가 차이 남을 보여 준다.

그림 6에 한발 PNS로 구한 위치를 나타내었다. 그림에서 한발 PNS에서는 방위각 편차로 인해 왼발 PNS로 구한 마지막 걸음 위치는 참값과 9.08 m, 오른발 PNS로 구한 위치는 11.88 m의 오차를 나타내었다. 이는 방위각 편차가 한발 PNS에 주는 영향이 크다는 것을 나타내며 신발에 IMU를 장착하는 경우 반드시 방위각 편차의 보상이 필요함을 나타낸다. 한발 PNS에서 방위각 편차의 보상에 따른 영향을 파악하기

그림 8. 양발 PNS-1에서 방위각 편차의 영향.
Fig. 8. The effects of the heading bias in a dual PNS-1.

위하여 초기 방위각 편차 $\theta_L(0)$, $\theta_R(0)$ 로 보정한 결과와 평균값 $\bar{\theta}_L$, $\bar{\theta}_R$ 으로 보정한 결과를 그림 7에 나타내었다. 초기값으로 보상하면 마지막 걸음은 참값과 오른발 0.11 m, 왼발 0.27 m의 오차를 나타내며, 평균값으로 보상하면 오른발 2.06 m, 왼발 1.26 m의 오차를 나타낸다. 보상에 의하여 정확도가 크게 향상되지만 실제 동작에서는 평균값을 미리 알지 못하므로 초기값으로 보상한 정도의 정확도를 얻을 수 있다.

그림 8에 양발 PNS 방법 1로 구한 이동 궤적을 나타내었다. 그림 6의 한발 PNS로 구한 이동 경로와 비교하여 양발 PNS의 경우 따로 보상하지 않아도 왼발과 오른발의 방위각 편차가 누적되는 과정에서 그 크기를 상쇄 시켜 발산을 막을 수 있음을 보여준다. $\theta_L(0)$, $\theta_R(0)$ 을 이용하여 보정한 양발 PNS에서는 마지막 걸음에서 오차가 0.41 m인 반면 보상하지 않은 양발 PNS에서는 오차가 2.83 m이며 시간이 지남에 따라 차이가 커짐을 볼 수 있다. 이는 양발의 방위각 편차가 대칭이라고 가정하였지만 그림 5에서 보는 바와 같이 실제

그림 9. 양발 PNS-2에서 방위각 편차의 영향.

Fig. 9. The effects of the heading bias in a dual PNS-2.

그림 10. 양발 PNS-1과 양발 PNS-2의 비교.

Fig. 10. Comparison of dual PNS-1 and dual PNS-2.

사용자의 방위각 편차는 왼발에 비하여 오른발의 방위각 편차가 평균 8° 정도 더 큰 차이를 나타내며, 이 영향이 누적되어 나타난다.

그림 9에 양발 PNS 방법 2로 구한 이동 궤적을 나타내었다. 그림 8과 비교하여 그림 9에서는 오른발과 왼발이 모두 나타나며, 최종위치는 양발 PNS 1의 결과와 같다. 그림 8과 같이 양발 PNS의 경우 따로 보상하지 않아도 왼발과 오른발의 방위각 편차가 누적되는 과정에서 그 크기를 상쇄시켜 발산을 막을 수 있음을 보여주며 $\theta_L(0)$, $\theta_R(0)$ 의 보상 유무에 따라 결과가 차이를 보인다. 이것도 사용자의 평균 8° 정도의 양발의 방위각 편차의 차이에서 기인한다.

그림 10에 왼발과 오른발의 평균을 사용하는 양발 PNS 방법 1과 왼발과 오른발을 교대로 이동하는 양발 PNS 방법 2의 결과를 동시에 나타내었다. 실험은 왼발을 먼저 걸은 경우로써 방법 1로 구한 위치는 방법 2의 오른발의 위치와 같음을 확인할 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 신발에 IMU가 부착되는 경우 구성 가능한 PNS에 대하여 항법 알고리즘을 유도하고, 진행 방향과 발의 방향의 불일치로 발생하는 방위각 편차의 영향을 분석하였다. 한발에만 IMU를 장착하는 한발 PNS는 방위각 편차의 영향으로 위치가 급격히 발산함을 이론과 실험을 통하여 확인하였다. 양발에 IMU를 장착하는 양발 PNS는 양발의 위치를 따로 구하고 이를 평균하여 사용자의 위치를 구하는 방법 1과 각 발의 위치를 별도로 구하는 방법 2의 두가지 방법을 제시하고 항법 알고리즘과 방위각 편차의 영향을 분석하였다. 양발 PNS에서는 오른발과 왼발의 방위각 편차가 서로 상쇄되어 한발 PNS에 비하여 월등한 성능 향상을 보임을 이론과 실험을 통하여 확인하였다. 이 과정에서 개인별로 오른발과 왼발의 방위각 편차가 정확하게 대칭이 되지 않으며 정확한 위치를 구하기 위해서는 개인별 차이도 동시에 고려해야 함을 확인하였다.

구현된 PNS 시스템을 이용한 실제 실험에서 한발 PNS는 최종 위치에 대하여 왼발 PNS는 9.08 m, 오른발 PNS는 11.88 m의 큰 오차를 발생하는 반면, 양발 PNS-1과 양발 PNS-2는 모두 2.83 m의 오차를 나타내어 제안한 방법이 방위각 편차를 효과적으로 제거함을 확인하였다. 한발 PNS에서 초기의 방위각 편차 측정값을 이용하여 보상하면 왼발 PNS는 1.26 m, 오른발 PNS는 2.06 m로 오차가 줄어들며, 같은 방법으로 양발 PNS의 방위각 편차를 보상하면 0.41 m로 오차가 줄어든 정확한 위치를 구할 수 있었다.

본 논문에서 제시한 결과는 신발에 IMU를 내장하는 형태의 PNS에서 방위각 편차를 효과적으로 제거하는데 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

REFERENCES

- [1] L. Ojeda, J. Borenstein, "Personal dead-reckoning system for GPS-denied environments," *Proc. of the 2007 IEEE International Workshop on Safety, Security and Rescue Robotics*, pp. 1-6, Italy, Sep. 2007.
- [2] H. U. Kim, S. H. Shin, C. G. Park, and S. E. Choi, "GPS-based real-time step length compensation for PDR," *Proc. of the 15th GNSS Workshop*, Busan, Oct. 2008.
- [3] S. Scapellato, F. Cavallo, C. Martelloni, and A. M. Sabatini, "In-use calibration of body-mounted gyroscopes for applications in gait analysis," *Journal of Sensors and Actuators*, vol. 123-124, pp. 418-422, May. 2005.
- [4] T. E. Kim, H. W. Lee, D. K. Chwa, and S. K. Hong, "Estimation of the sensor location and the step for personal navigation system," *Proc. of 2010 The Korean Institute of Electrical Engineers*, vol. 59, no. 11, pp. 2058-2065, Nov. 2010.
- [5] A. Peruzzi, U. D. Croce, and A. Cereatti, "Estimation of stride length in level walking using an inertial measurement unit attached to the foot: A validation of the zero velocity assumption during stance," *Journal of Biomechanics*, vol. 44, no. 10, pp. 1991-1994, 2011.
- [6] S. S. Kim, J. H. Moon, Y. C. Shin, and C. Park, "Accurate heading determination using two low Cost IMUs in personal navigation system," *Proc. of International Symposium on GPS/GNSS 2012*, Xi'an, Nov. 2012.

- [7] S. S. Kim, J. H. Moon, K. A. Kim, E. J. Cha, and C. Park, "Personal navigation system using low-cost IMU attached to shoes," *Proc. of 2012 The Korean Institute of Electrical Engineers*, pp. 1236-1237, Jul. 2012.
- [8] B. Mariani, H. Rouhani, X. Crevoisier, and K. Aminian, "Quantitative estimation of foot-flat and stance phase of gait using foot-worn inertial sensor," *Journal of Gait & Posture*, vol. 37, no. 2, pp. 229-234, Jul. 2012.
- [9] D. J. Young, "Personal navigation via high-resolution gait-corrected inertial measurement units," *IEEE transactions on Instrumentation and measurement*, vol. 59, no. 11, pp. 3018-3027, Nov. 2010.
- [10] E. Foxlin, "Pedestrian tracking with shoe-mounted inertial sensors," *IEEE Computer Graphics and Applications*, vol. 25, no. 6, pp. 38-46, Nov. 2005.
- [11] C. Ascher, C. Kessler, M. Wankler, and G. F. Trommer, "Dual IMU indoor navigation with particle filter based map-matching on a smartphone," *Proc. of International Conference on Indoor Position and Indoor Navigation (IPIN)*, Switzerland, Sep. 2010.
- [12] A. R. Jimenez Ruiz, F. S. Granja, J. C. P. Honorato, and J. I. Guevara Rosas, "Pedestrian indoor navigation by aiding a foot-mounted IMU with RFID signal strength measurements," *Proc. of International Conference on Indoor Position and Indoor Navigation (IPIN)*, Switzerland, Sep. 2010.
- [13] D. Y. Kang, "Development of a personal navigation system including activity monitoring function," Master Dissertation (in Korean), Chungbuk National University, 2008.
- [14] Y. H. Kim, B. S. Choi, and J. M. Lee, "Hybrid car navigation system using GPS and dual electric compass," *Journal of Control, Automation, and Systems Engineering (in Korean)*, vol. 12, no. 2, pp. 106-112, Feb. 2006.

김 상 식

2012년 충북대학교 전자공학과 졸업.
2012년~현재 동 대학원 제어로봇공학과 석사과정. 관심분야는 PNS, INS, GNSS, WSN, 마이크로 프로세서 응용.

이 연 규

1998년 충북대학교 전자공학과 졸업.
2000년 동대학 컴퓨터과학과 석사. 2000년~2003년 한국전자통신연구원 연구원.
2007년 동대학 제어계측공학과 박사.
2009년 한국항공우주연구원 선임 연구원. 2010년~현재 충북대학교 전자정보대학 강사. 관심 분야는 오차해석, H_∞ 제어.

박 찬 식

1984년 서울대학교 제어계측공학과 졸업. 1986년 동 대학원 석사. 1997년 동 대학원 박사. 1984년~1997년 삼성전자 연구원. 2002년~2003년 Delft Technical University, the Netherland 방문연구원, 1997년~현재 충북대학교 교수. 관심분야는 GNSS, PNS, SDR, AJ, 미지 정수 결정 알고리즘, 오차해석, 무인차항법 등.