

IMU 센서를 사용한 보행항법 기반 실내 위치 측위 연구

A Study on Indoor Positioning based on Pedestrian Dead Reckoning Using Inertial Measurement Unit

이정표¹ · 박경은² · 김영익^{3*}Jeongpyo Lee¹, Kyung-Eun Park², Youngok Kim^{3*}¹Graduate student, Electronic Engineering Department, Kwangwoon University, Seoul, Republic of Korea²Graduate student, Electronic Engineering Department, Kwangwoon University, Seoul, Republic of Korea³Professor, Electronic Engineering Department, Kwangwoon University, Seoul, Republic of Korea

*Corresponding author: Youngok Kim, kimyoungok@kw.ac.kr

ABSTRACT

Purpose: In this paper, we propose an indoor positioning scheme based on pedestrian dead reckoning using inertial measurement unit. By minimizing the effects of the orientation error of smart-phone, the more accurate estimation for the direction, the step count, and the stride can be achieved. **Method:** The effectiveness and the performance of the proposed scheme is evaluated by experiments, and it is compared with the conventional scheme in the same conditions. **Result:** The results showed that the positioning error of the proposed scheme was 0.76m, while that of the conventional scheme was 1.84m. **Conclusion:** Since most people carry his/her own smart-phone, the proposed scheme can be helpful to recognize where he/she was and was heading when the fast evacuation is needed in indoors.

Keywords: Positioning, PDR, IMU Sensor, Smart-phone

요약

연구목적: 본 논문에서는 스마트 폰의 IMU센서를 사용한 PDR 방식의 실내 위치 추적 기법을 제안하고자 하며, 보다 정확한 추정을 위해 스마트 폰의 자세 변화로 인한 오류를 최소화하여 이동방향, 걸음 수, 보폭의 세 가지 정보를 추정하는 방법을 제안하고자 한다. **연구방법:** 제안된 기법의 유효성과 성능을 실험을 통해 확인하고자 하였으며, 동일한 조건에서 기존 성능기법과 비교해 본 논문에서 제안하는 기법을 입증하고자 한다. **연구결과:** 실험을 통해 측정된 측위 오차는 기존 기법의 평균 오차가 1.84m이고, 제안된 기법의 평균 오차는 0.76m로서 제안된 기법이 기존 기법보다 보행자의 실제 이동 방향과 위치를 더욱 정확하게 추정할 수 있음을 확인하였다. **결론:** 본 논문에서 제안하는 스마트 폰의 IMU센서를 사용한 PDR 방식의 실내 위치 추적 기법은 모든 국민이 보유한 스마트 폰을 활용하여 재난 시 신속한 대피를 위한 자신의 위치 인식 및 이동 방향 인식에 활용이 가능할 것으로 기대된다.

핵심용어: 측위, 보행항법, 관성센서, 스마트 폰

Received | 9 July, 2021

Revised | 24 August, 2021

Accepted | 2 September, 2021

 OPEN ACCESS

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted noncommercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Introduction

최근 대형 상가, 지하철 등의 건축 시설에 실내 공간이 대형화되고 복잡해지면서 건물 화재, 붕괴, 지하철 테러, 폭발, 화재 방사고 등의 재난이 발생하는 상황에서 자신의 현재 위치와 이동방향에 대한 인식이 어려워 신속한 대피를 할 수 없는 환경이 증가하고 있으며, 공사현장, 공장 등지에서도 안전사고를 예방하고 신속한 대응을 위해 다양한 실내 측위 시스템이 요구되고 있다(Kuutti et al., 2018; Villania et al., 2018; Deak et al., 2012; Bisio et al., 2014; Talvitie et al., 2015; Zhou et al., 2016). 대형 실내 공간에서의 재난은 좁고 복잡한 실내 공간의 특성으로 인하여 그 피해규모가 매우 커지는 경향이 있으며, 재난 발생 초기에 차분한 대응을 통해 신속하고 안전한 대피를 할 수 있음에도 일반 시민들은 두려움과 긴장으로 인하여 자신의 현재 위치와 이동방향을 정확하게 인식하기 어려워지게 된다. 소방대원 역시 자신의 위치를 몰라 위험에 빠지는 경우가 많으며, 미국에서는 1999년도에 메사추세츠 주에 위치한 Worcester Cold Storage Warehouse 사의 창고 형 건축물의 화재에서 미로와 같은 내부와 창문이 없는 구조 속에 짙은 연기로 인하여 길을 잃어버린 6명의 소방대원이 사망하는 사고가 발생하는 사고가 있었으며, 국내에서도 2012년 인천 물류창고 화재 시 화재 진압과 인명구조를 수행하기 위해 24년 경력의 베테랑 소방대원이 건물 지하에 진입하였다가 출구가 봉쇄되어 질식사하여 순직하는 사고가 있었다.

현재 실내 공간에서 위치 추적을 위한 추가적인 인프라 구축비용을 최소화 하고 개인 정보의 노출 없이 대중적으로 활용될 수 있는 Pedestrian Dead Reckoning(PDR)과 같은 보행항법기술을 포함하는 스마트폰 또는 웨어러블 장치에 내장되어 있는 센서를 이용한 관성 측정기반 측위를 사용한 많은 연구들이 이루어지고 있다(Harle, 2013; Kim et al., 2015; Fischer et al., 2009; Park et al., 2021). 그러나 PDR 기반 측위는 스마트폰 또는 웨어러블 장치에 내장된 저가의 센서를 사용해 방향, 이동간격 등의 에러 문제로 측위의 정확성이 저감하게 되는 단점으로 인하여 전파를 이용한 측위 기술과 결합되거나(Kim et al., 2015), extended Kalman filter와 principal component analysis 기법 등의 높은 연산량을 요구하는 한계가 있다(Park et al., 2021). 본 논문에서는 스마트폰의 Inertial Measurement Units (IMU)센서를 사용한 PDR 방식의 실내 위치 추적 기법을 제안하고자 하며, 보다 정확한 추정을 위해 스마트 폰의 자세 변화로 인한 오류를 최소화하여 이동방향, 걸음(스텝) 수, 보폭의 세 가지 정보를 추정하고, 이를 기반으로 사용자의 위치를 추적하는 기법을 제안하고자 한다.

System Description

PDR 은 초기 위치를 알고 있을 때 그 위치에서부터 이동 방향과 이동 거리를 추정하여 재귀적으로 위치를 추정해 나가는 방법으로 3가지의 정보를 필요로 한다. 첫 번째는 보행자의 이동 방향, 두 번째는 보행자의 걸음수, 세 번째는 보폭이며, 걸음수와 보폭을 곱하여 이동 거리를 추정하게 된다. 추정된 이동거리와 이동방향을 결합하면 재귀적으로 보행자의 상대적 위치를 추정할 수 있다.

Fig. 1은 PDR 기반 위치 추정 개념을 나타내고 있다. 그림에서 보여진 것과 같이 이전 최종 위치의 좌표 (x_{k-1}, y_{k-1}) 에서 이동방향과 이동거리를 이용하여 현재의 위치 (x_k, y_k) 를 추정할 수 있으며, 이를 다음의 수식 (1)과 같이 표현할 수 있다 (Beaugard et al., 2006).

일반적으로 스마트폰에 내장된 IMU 센서를 통해 이동방향, 걸음수, 보폭의 세 가지 정보를 추정할 수 있다. IMU 센서는 스마트폰에 고정된 형태로 부착되어 있기 때문에 센서의 출력은 스마트폰의 자세에 따라 달라지게 되어 Fig. 2와 같이 보행

자의 위치를 추정하기 위한 글로벌 좌표계와 일치하지 않아 위치 추정에 오류를 일으키는 문제가 발생한다. 따라서 IMU 센서의 출력을 글로벌 좌표계로 변환하기 위해 스마트폰의 자세를 추정할 필요가 있다.

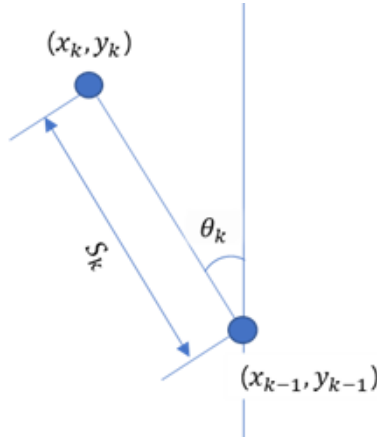


Fig. 1. Concept of PDR scheme

$$\begin{bmatrix} x_k \\ y_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & S_k \cos \theta_k \\ S_k \sin \theta_k & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{k-1} \\ y_{k-1} \end{bmatrix} \quad (1)$$

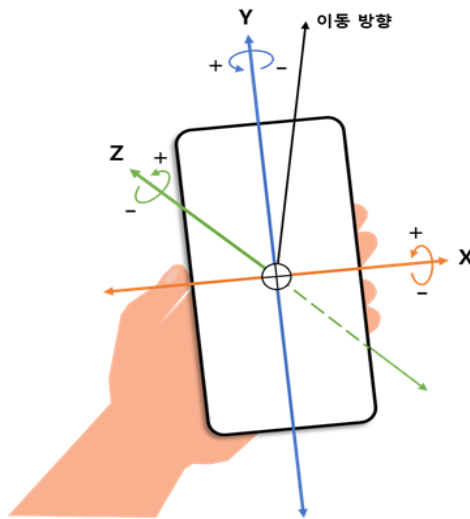


Fig. 2. Axis of smart phone's sensors and direction of walk

Proposed scheme

본 논문에서는 스마트폰의 IMU센서를 사용한 PDR 방식의 실내 위치 추적 기법을 제안하고자 하며, 보다 정확한 추정을 위해 스마트폰의 자세 변화로 인한 오류를 최소화하여 이동방향, 걸음(스텝) 수, 보폭의 세 가지 정보를 추정하는 방법을 제

안하고자 한다. 제안하는 기법은 스마트폰 자세 추정, 걸음(스텝) 인식, 이동 방향 추정 및 보폭 추정의 4가지 순서로 이루어진다. 먼저 스마트폰의 자세를 표현하기 위하여 쿼터니언을 사용하였으며, 추정된 스마트폰의 자세와 가속도 센서를 사용하여 걸음을 인식한다. 보행자가 스마트폰을 들고 이동할 때 스마트폰의 좌표계에서의 방향과 보행자의 방향은 일치하지 않을 수 있다. 따라서 보행 시 발생하는 가속도 센서의 데이터를 사용하여 스마트폰이 향하는 방향과 실제 사람의 이동방향의 차이를 추정하여 사람의 방향 추정에 반영한다. 마지막으로 보행자가 걷는 과정에서 발생하는 체고의 상하 방향 움직임을 가속도 센서를 통하여 측정하고 이를 통해 보폭을 추정하는 방법을 제안한다. Fig. 3은 제안된 기법을 통한 위치 추정 과정에 대한 구성도를 나타내고 있다.

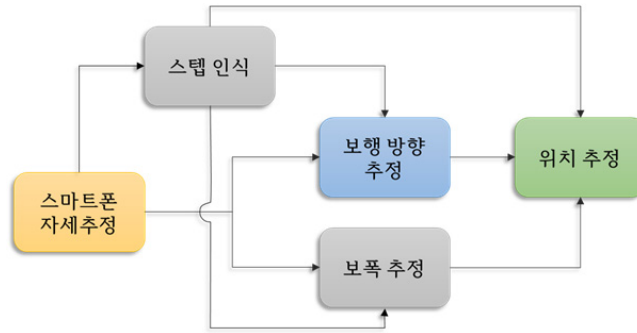


Fig. 3. System diagram of the process of the proposed scheme

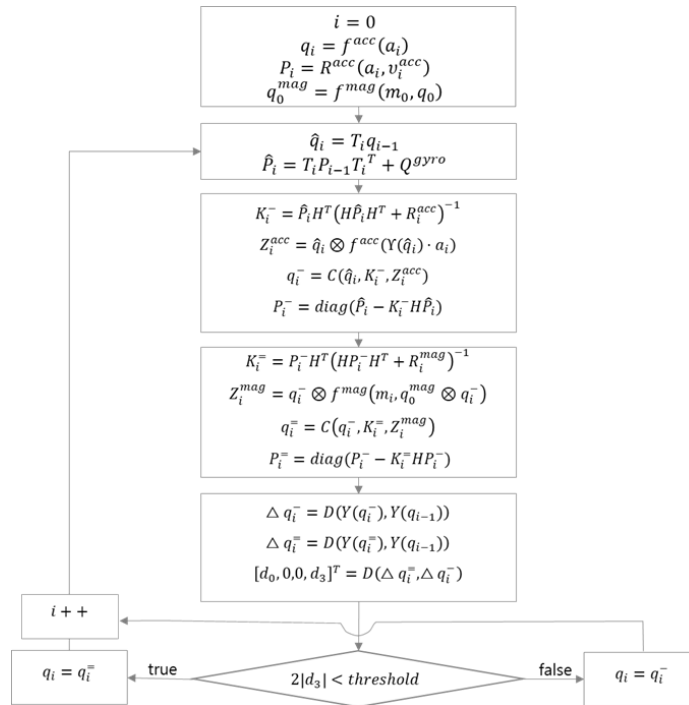


Fig. 4. Flow chart of posture estimation process of smart phone

스마트 폰 자세 추정

스마트 폰의 IMU 센서에는 가속도, 자이로, 지자기의 세 가지 센서가 포함되어 있다. 자이로 센서로 측정된 3축의 각속도를 적분하면 스마트 폰의 방향을 계산할 수 있지만 적분으로 인한 오차가 계속 누적되어 시간이 지나면서 오차가 계속 커지게 된다. 가속도 센서로는 중력 벡터의 방향을, 지자기 센서로는 자기벡터의 방향을 측정하여 보정하면 적분으로 인한 오차를 줄일 수 있다. 다만 이 벡터들은 외부적 요인에 의해 쉽게 교란되기 때문에 적절한 필터링이 필요하다. 따라서 스마트 폰의 자세 추정을 통하여 센서의 x, y, z 축의 출력을 보행자 좌표계에서 나타낼 수 있으며, 스마트 폰의 세 가지 센서와 칼만필터를 사용하여 자세를 추정하는 과정을 정리하여 나타내면 Fig. 4와 같다.

상기의 순서도에서 i 는 샘플링 시간을 나타내는 인덱스이며, 가속도, 지자기, 자이로 센서를 사용하여 매 샘플링 시간마다 스마트 폰의 자세를 나타내는 쿼터니언 q_i 를 계산하는 과정을 나타낸다. 이 때 쿼터니언은 칼만필터를 사용하여 재귀적으로 계산되며, 순서도에 사용된 각 항들에 대한 정의는 Table 1에 정리하였다.

Table 1. Variables and functions for posture estimation of smart phone

변수 명	의미
a_i, m_i, g_i	각각 i 번째 샘플링 된 가속도, 지자기, 자이로 벡터
q_i, P_i	스마트 폰의 자세를 나타내는 쿼터니언과 그 오차분산
T_i, Q^{gyro}	g_i 와 직전 추정 자세 q_{i-1} 로 계산한 쿼터니언 천이행렬과 그 오차분산
$f^{acc}(a)$	가속도 벡터를 스마트 폰의 z축 방향과 같도록 회전시키는 쿼터니언을 구하는 함수
$f^{mag}(m, q)$	지자기 벡터를 스마트 폰의 x축 방향과 같도록 회전시키는 쿼터니언을 구하는 함수
q_0^{mag}	$f^{mag}(m, q)$ 의 첫번째 값
R^{acc}	가속도 벡터와 그 이동 분산의 크기로 추정된 의 분산
R^{mag}	자자기 벡터의 측정 오차분산을 통해서 추정된 의 오차분산
$K^-, K^=$	칼만 게인
H, E	단위행렬
Z	측정 쿼터니언
$C(q, K, Z)$	단위 쿼터니언과 칼만 게인을 고려한 쿼터니언 보간 함수
$Y(q)$	쿼터니언에서 z축 회전만 분리하는 함수
$D(q_1, q_2)$	두 쿼터니언의 회전 차이를 구하는 함수
\bar{q}^-	가속도 센서와 자이로 센서를 결합하여 추정한 자세
$\bar{q}^=$	가속도 센서, 자이로 센서와 지자기 센서를 결합하여 추정한 자세
$Y(q)$	쿼터니언을 회전행렬로 변환하는 함수
$q_1 \otimes q_2$	쿼터니언 곱

순서도에서 보여진 자세를 추정하는 과정에서 사용된 쿼터니언을 구하는 함수는 다음과 정의된다. 먼저 스마트 폰의 z축이 측정되는 가속도의 방향과 같도록 하는 쿼터니언은 다음 수식 (2)와 수식 (3)을 통해 구할 수 있다(Valenti et al., 2015).

$$\Upsilon({}_{rp}\hat{q})[001]^T = [a_x a_y a_z], \|a\| = 1 \tag{2}$$

$$f^{acc}(a) = {}_{rp}\hat{q} = \begin{cases} \left[\sqrt{\frac{a_z+1}{2}} \frac{-a_y}{\sqrt{2(a_z+1)}} \frac{a_x}{\sqrt{2(a_z+1)}} 0 \right]^T, & a_z \geq 0 \\ \left[\frac{-a_y}{\sqrt{2(1-a_z)}} \sqrt{\frac{1-a_z}{2}} \frac{a_x}{\sqrt{2(1-a_z)}} 0 \right]^T, & a_z < 0 \end{cases} \tag{3}$$

한편, 스마트폰의 z축이 중력의 방향과 같도록 하는 쿼터니언이 ${}_{rp}q$ 일 때, xy평면에서 자기장의 방향을 스마트폰의 x축과 같아지도록 하는 쿼터니언은 다음 수식 (4)와 수식 (5)를 통해 구할 수 있다(Beaugard et al., 2006).

$$\Upsilon^T({}_{rp}q)[m_x m_y m_z]^T = [l_x l_y l_z]^T \tag{4}$$

$$\Upsilon^T({}_{mag}q)[l_x l_y l_z]^T = \left[\sqrt{l_x^2 + l_y^2} 0 l_z \right]^T$$

$$f^{mag}(m, {}_{rp}q) = {}_{mag}q = \begin{cases} \left[\sqrt{\frac{L+l_x\sqrt{L}}{2}} 0 0 \frac{l_x}{\sqrt{2L+l_x\sqrt{L}}} \right]^T, & l_x \geq 0 \\ \left[\frac{l_y}{\sqrt{2L-l_x\sqrt{L}}} 0 0 \sqrt{\frac{L-l_x\sqrt{L}}{2}} \right]^T, & l_x < 0 \end{cases} \quad L = l_x^2 + l_y^2 \tag{5}$$

초기 방향부터 현재 방향까지의 xy평면에서 자기장 회전을 나타내는 쿼터니언 ${}_y\hat{q}$ 는 수식 (6)과 같다.

$${}_y\hat{q} = q_0^{mag*} \otimes {}_{mag}q \tag{6}$$

만일 측정 외력이 중력만 있을 때, ${}_{rp}\hat{q} = {}_{rp}q$ 되며 자기장이 위치에 따라 변하지 않을 때 ${}_y\hat{q} = {}_yq$ 가 된다. 이 때, 쿼터니언과 자이로 각속도의 관계는 수식 (7)과 같다.

$$\dot{q} = \frac{1}{2} \Omega q, \quad \Omega = \begin{bmatrix} 0 & \omega_x & \omega_y & \omega_z \\ -\omega_x & 0 & \omega_z & \omega_y \\ -\omega_y & -\omega_z & 0 & \omega_x \\ -\omega_z & \omega_y & \omega_x & 0 \end{bmatrix} \tag{7}$$

따라서 자이로 센서를 이용한 자세 측정은 초기값으로 ${}_{rp}\hat{q}$ 를 사용한다고 하면 수식 (8)과 같고, 측정 가속도에 중력 이외의 값이 포함될 경우는 수식 (9)와 같다.

$$\hat{q}_i = \left(E + \Omega_i \frac{\Delta t}{2} \right) q_{i-1} \quad (8)$$

$$\Upsilon(\hat{q}_i) a_i = \hat{g} = [\hat{g}_x \hat{g}_y \hat{g}_z]^T \neq [001]^T \quad (9)$$

가속도 센서로 측정된 ${}_{rp}\hat{q}$ 와 자이로 센서로 측정된 쿼터니언의 차이는 수식 (10)이 되고, 마찬가지로 위치에 따라 자기장이 변할 경우는 수식 (11)과 같다.

$$\Delta {}_{rp}q = \left[\sqrt{\frac{\hat{g}_z+1}{2}} \frac{-\hat{g}_y}{\sqrt{2(\hat{g}_z+1)}} \frac{\hat{g}_y}{\sqrt{2(\hat{g}_z+1)}} 0 \right]^T \quad (10)$$

$$\Upsilon^T(q_0^{mag} \otimes \hat{q}_i) [m_x \ m_y \ m_z]^T = [\hat{m}_x \ \hat{m}_y \ \hat{m}_z]^T \neq [\sqrt{l_x^2 + l_y^2} \ 0 \ l_z]^T \quad (11)$$

따라서 지자기 센서로 측정된 ${}_y\hat{q}$ 와 자이로 센서로 측정된 쿼터니언의 차이는 수식 (12)와 같다.

$$\Delta {}_yq = \left[\sqrt{\frac{M + \hat{m}_x \sqrt{M}}{2M}} \ 0 \ 0 \frac{\hat{m}_y}{\sqrt{2M + l_x \sqrt{M}}} \right]^T, \quad M = \hat{m}_x^2 + \hat{m}_y^2 \quad (12)$$

z축은 자이로 센서로 나머지 두 축은 가속도 센서로 측정된 자세 쿼터니언은 다음과 같이 표현된다.

$$Z^{acc} = \hat{q}_i \otimes \Delta {}_{rp}q \quad (13)$$

추정 쿼터니언 q_0 의 초기 z축 회전은 0으로 가정했기 때문에, 즉 \hat{q}_0 가 항등원 이므로, 초기값은 다음과 같이 표현된다.

$$q_0 = Z_0^{acc} = f^{acc}(a_0) = {}_{rp}\hat{q}_0 \quad (14)$$

한편, z축은 지자기 벡터로, 나머지 두 축은 \hat{q}_i 대신 q^- 을 사용하여 측정된 자세 쿼터니언은 다음과 같이 표현된다.

$$Z^{mag} = q^- \otimes \Delta {}_yq \quad (15)$$

칼만 필터를 사용하여 가속도, 자이로만 사용한 자세 쿼터니언 q^- 과 추가적으로 지자기 보정을 한 쿼터니언 $q^=$ 을 구할 수

있다. 이 때, q^- 과 q^+ 의 미분의 차는 지자기 교란이 없을 때 자이로 적분 오차 이내의 값을 가져야하므로 q_{i-1} 과 q_i^- , q_i^+ 의 z 축 회전량의 차이를 이용하여 지자기 교란 여부를 판단할 수 있다. 지자기 교란이 자이로 적분오차 이내인 경우 q_i 를 q_i^+ 로 업데이트 하고, 지자기가 교란되었다고 판단될 경우 q_i 를 q_i^- 로 업데이트 하여 지자기 벡터를 선택적으로 보정에 사용할 수 있다.

걸음 인식

보행 시 디딤 발이 땅에 닿는 순간 지면에 대한 반력으로 보행 방향의 반대방향과 지면에 대해 수직인 방향으로 반력이 발생한다. 반력은 진행방향과 반대방향으로 발생하므로 발을 내 딛는 순간 속도는 줄어들게 되므로 천천히 걷는 경우 y축 방향의 반력이 크며 빠르게 걷는 경우 체고의 이동 시간이 짧아져 z축 방향의 반력이 크게 나타난다. z축과 y축은 반력의 부호가 반대이고 반력이 발생할 때 속도의 방향이 바뀌는 z축이 y축에 비해 비교적 반력의 크기가 크므로 실험을 통해 경험적으로 z-2y의 값을 설정하여 사용하였다. 보행 시 한 걸음의 패턴은 비교적 주기적으로 발생하므로 반력의 형태를 고려하여 한 걸음의 패턴과 convolution을 취하면 보행에 대해 주기적인 신호를 얻을 수 있다. Fig. 5는 실험을 통해 얻어진 한 걸음의 패턴 신호를 보여주고 있다.

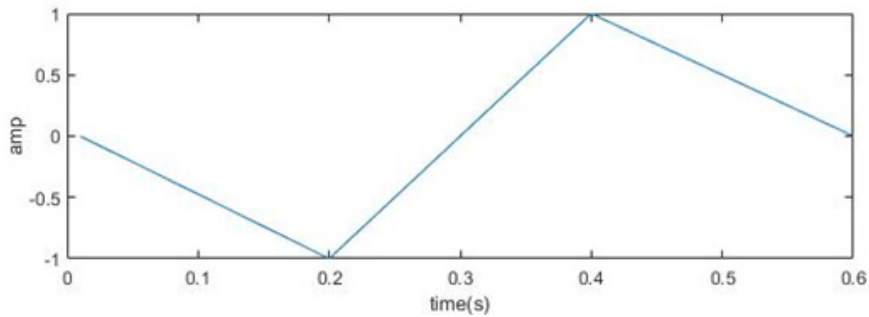


Fig. 5. Pattern signal for step detection

반력이 보행에 따라 주기적으로 나타나므로 이 신호 또한 주기적으로 나타나게 되는데 신호가 최대가 되는 시점은 반력이 사라지는 시점이므로 이때를 한 걸음 인식 시점으로 정의할 수 있다. 그러나 이 값의 크기는 반력의 크기에 따라 변하고 걸음 사이사이에 일정하지 않은 보행으로 인한 노이즈가 나타날 수 있다. 작은 문턱 값을 사용하여 양수만을 취한 뒤 여러 번 미분하면 신호가 양수 일 때의 구간을 찾을 수 있으며, 이 사이에서 최댓값을 취하면 한 걸음이 실제로 일어나는 구간을 파악하는 것이 가능하다. Fig. 6는 걸음을 인식하기 위한 신호처리 과정을 나타내고 있으며, Fig. 7은 실제 실험을 통해 얻은 보행 데이터와 한 걸음 패턴 신호와의 convolution을 수행한 결과를 나타내고 있다. 그림에서 보여진 것과 같이 최댓값의 검출을 통해 걸음 수를 추정할 수 있다.

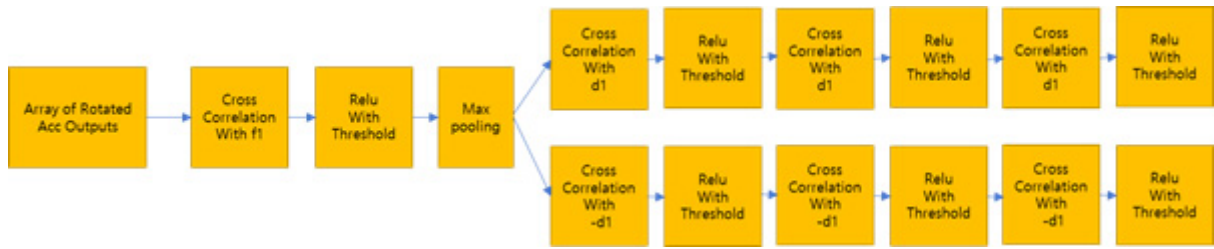


Fig. 6. Process for step detection

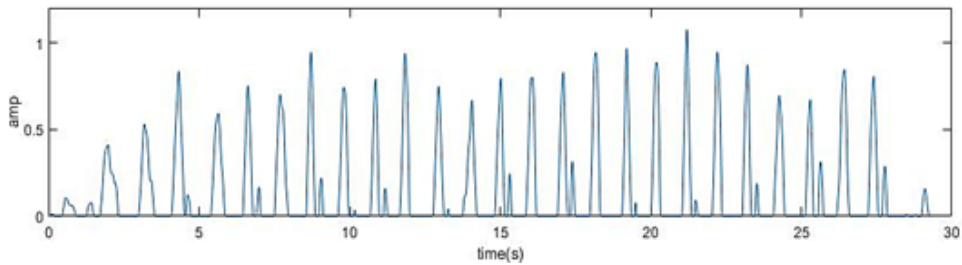


Fig. 7. Result of convolution

Fig. 8은 보행 시에 한 걸음이 완료되는 구간을 찾고, 한 걸음 구간이 찾아지면 구간 내에서 최대 반력을 찾아 방향을 보정하고 가속도를 스텝 구간에서 적분하여 보폭을 구하기 위한 실 데이터를 보여주고 있다.

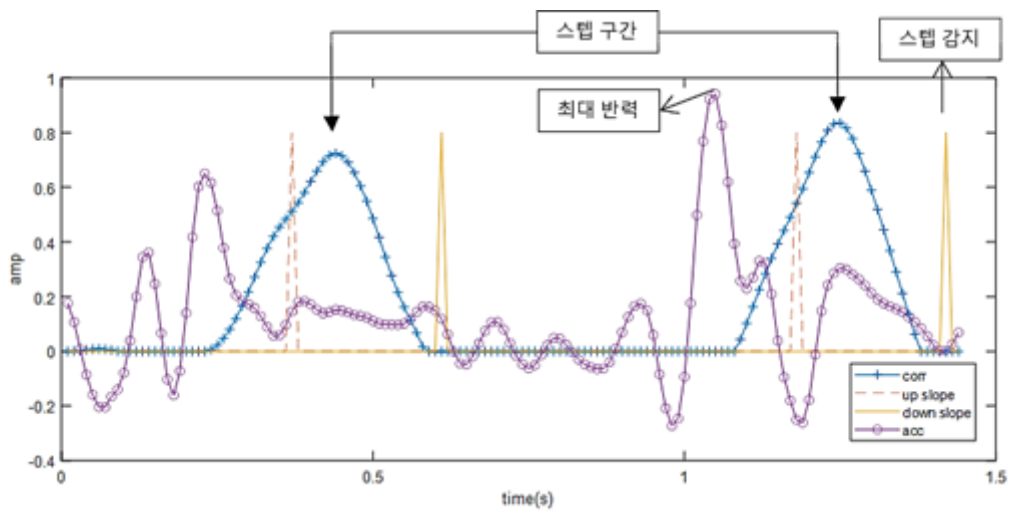


Fig. 8. Result of step detection

보행방향 추정

보행자는 스마트폰을 y축 방향으로 들고 이동하지만 실제 이동방향과 스마트폰의 y축은 완전히 일치하지 않을 수 있다. 스마트폰을 쥐고 있는 손은 항상 이동방향과 스마트폰의 y축을 완벽하게 일치시킬 수 없기 때문이고, 이에 따른 검증을 위

한 실험은 다음과 같이 이루어졌다. Fig. 9은 A대학교 B관 6층 복도에서 보행자가 직선으로 왕복한 실험의 데이터로 이동방향에 수직한 가속도를 빨간색 원으로, 이동방향의 가속도를 파란색 원으로 표시하였다. 보행자는 스마트폰의 y축 방향으로 이동하는 것이 가정되었기 때문에 이동방향의 반력은 y축과 평행하게 그에 수직한 반력은 x축과 평행하게 측정되어야 하나 실제로는 그림과 같이 축에서 일정한 각도를 가지게 된다. 이 각도를 보정하면 스마트폰의 파지 상태에 따른 방향 오차를 보정할 수 있다.

보행 시 발생하는 반력은 이동 방향의 반대 방향으로 나타나게 되는데 보행은 왼발과 오른발이 번갈아가면서 이루어지기 때문에 보행방향과 z축에 수직한 방향의 반력은 서로 반대방향으로 번갈아가면서 나타나게 된다. 반력은 한 스텝의 구간 중에서 가속도 성분의 최댓값을 취하여 구할 수 있으므로 보행자의 방향과 스마트폰의 파지 각도가 일정하다면 두 스텝의 x, y 축의 반력을 더하여 보행방향을 구할 수 있다. 그러나 실제로 센서 오차, 자세 추정 오차, 보행자의 회전, 스마트폰 파지 자세의 변화 등으로 인해 단순한 벡터 합으로는 방향을 알기가 어렵다. 따라서 SVD를 통하여 이전 스텝과 현재 스텝의 x, y 축 반력을 수직한 두 축으로 분리하고 필터링을 통하여 스마트폰의 y축이 향하는 방향과 결합하여 보행 방향을 추정하였다.

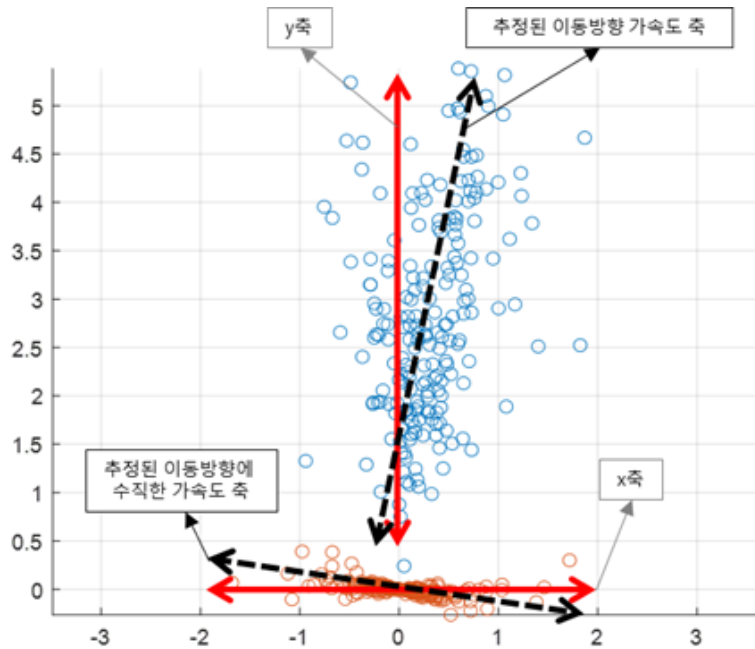


Fig. 9. Accelerations for the direction of movement and the orthogonal direction

보폭 추정

한 걸음의 시점을 정확하게 알 수 있다면 이중 적분을 통하여 보폭을 추정하는 것이 가능하지만 실제로는 스마트폰 가속도 센서의 적분 오차가 너무 크기 때문에 단순한 적분으로는 보폭을 구할 수 없다. 다만 사람은 보행 시 z축 방향으로도 움직이므로 이 움직임의 변화를 통해 보폭을 추정하는 것이 가능하다. 수평한 지면을 따라 이동하는 사람은 z축 방향으로 이동하지 않으므로 이 방향에 대한 속도의 변화량, 위치의 변화량은 한 스텝의 적분에 대해 0이 되어야 한다. 이 조건을 만족하도록 가속도 성분의 z축에 보정 항을 더해주었다. 보정항은 수식 (16)과 같이 시간에 따른 1차 항을 사용했고, 보정 항의 계수는

가속도를 적분해서 나온 값이 되도록 최소 제곱법을 이용하여 구하였다. 이렇게 보정된 한 걸음의 가속도를 2차 적분한 결과는 아래 Fig. 10과 같다. 제안된 방법을 통해 매 걸음이 감지될 때마다 보폭을 추정할 수 있다.

$$e = at + b \tag{16}$$

Fig. 10에서 보여진 것과 같이 z축 방향으로의 체고의 변화량 h 를 이용하여 보폭을 계산할 수 있다. 보통 보행자가 다리를 내딛을 때는 무릎이 펴져 있는 상태이기 때문에 발목의 회전을 무시할 경우 보행자의 다리길이를 l 이라고 했을 때 보폭 s 는 Fig. 11과 같이 구해낼 수 있고, 수식 (17)로 계산된다. 실제 실험에서는 $l = 1$ 을 사용하였다.

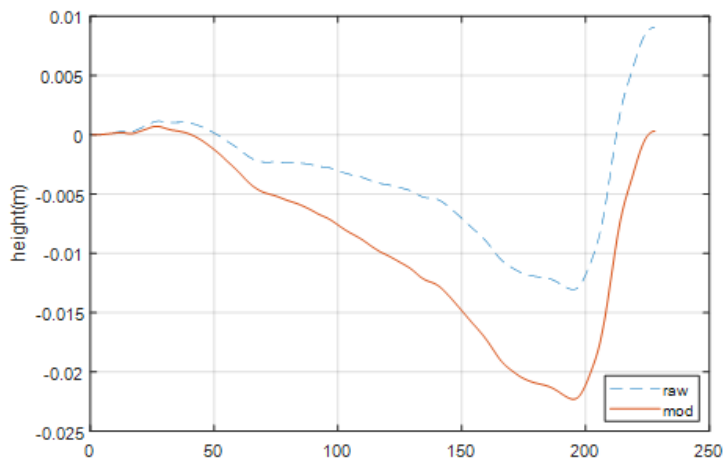


Fig. 10. Double integral of acceleration for one step and its modified one

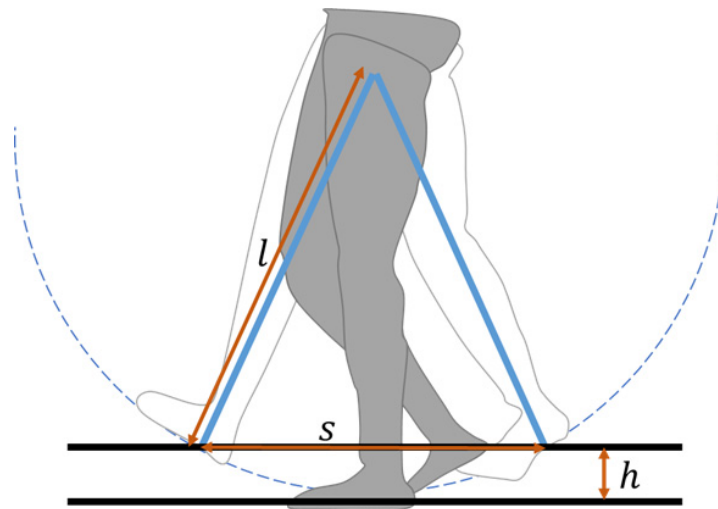


Fig. 11. Simplified motion of walking

$$s = 2\sqrt{2lh - h^2} \quad (17)$$

Experiment results

보행자의 연속적인 위치 추정의 정확도를 확인하기 위해 스마트폰 어플리케이션을 개발하여 두 가지 실험을 진행하였다. 보행자의 초기 위치는 알려져 있으며, 스마트폰을 세로방향으로 쥐고 화면을 보면서 이동하는 것을 가정하였다. 실험은 기존 기법(Kim et al., 2015)과 제안된 기법을 동일한 조건에서 비교하였고, 샘플링 주파수는 100Hz이며 실험 장소는 A대학교 B관 6층 복도에서 진행하였다. 첫 번째 실험은 약 65m 거리의 복도를 직선으로 왕복하는 보행자의 이동 방향을 추정하는 실험을 진행하였고, 두 번째 실험은 앞선 실험보다 다소 복잡한 경로로 이동하는 실험을 진행하였다. 실험결과는 보행자가 실제로 이동한 경로인 ground truth와 기존 방법과 제안 기법으로 추정한 각각의 위치를 비교하여 표시하였다.

Fig. 12는 복도를 직선으로 왕복으로 이동한 첫 번째 실험 결과를 나타내고 있다. 그림에서 보여진 것과 같이 기존 기법과 제안 기법 모두 보행자의 위치를 잘 추정하고 있음을 알 수 있다. 다만 130m의 거리를 보행자가 이동하는 실험에서 기존 기법의 평균 오차가 3.19m이고, 제안된 기법의 평균 오차는 3.12m로 제안 기법은 기존 기법보다 약간의 성능이 개선되었다.

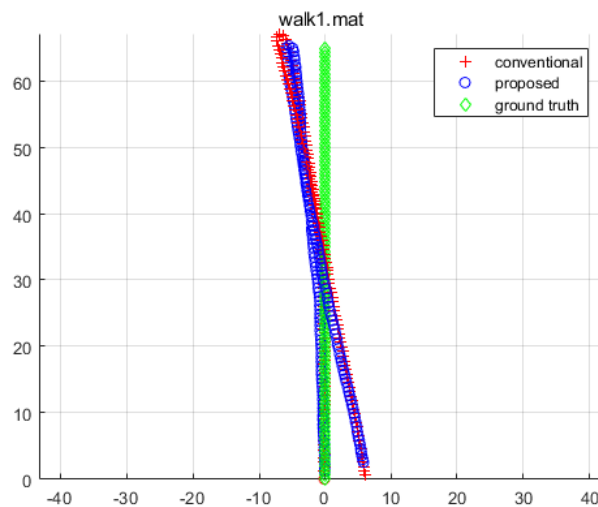


Fig. 12. Experiment result for 1st case

Fig. 13은 보다 복잡한 경로를 이동한 두 번째 실험 결과를 나타내고 있다. 그림에서 보여진 것과 같이 기존 기법의 평균 오차가 1.84m이고, 제안된 기법의 평균 오차는 0.76m로서 제안된 기법이 기존 기법보다 보행자의 실제 이동 방향과 위치를 더욱 정확하게 추정하였음을 확인할 수 있다. 기존 기법과 제안된 기법의 위치 추정 결과와 실제 경로와의 평균 오차를 계산한 결과는 Table 2에 요약하였다.

Table 2. Summary of experiment results

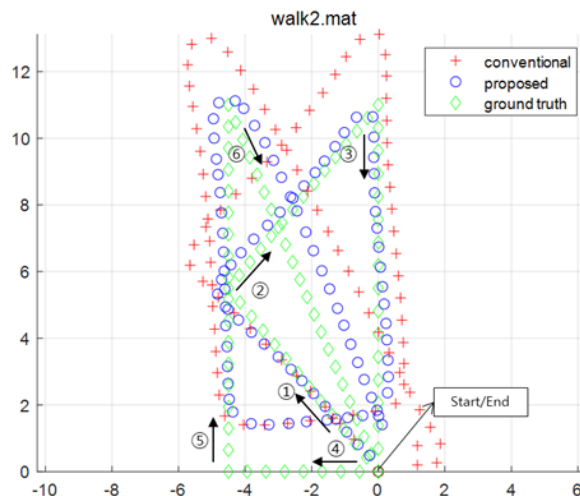
구분	experiment 1		experiment 2	
scheme	conventional	proposed	conventional	proposed
average error (m)	3.19	3.12	1.84	0.76

Conclusions

본 논문에서는 스마트폰에 들어있는 9축 IMU 센서를 사용하여 사용자의 위치를 연속적으로 추적하는 PDR 방식의 실내 위치 추적 기법을 제안하였다. 보행자의 위치를 보다 정확하게 추정하기 위해 스마트폰의 자세 변화로 인한 오류를 최소화 하여 이동방향, 걸음 수, 보폭의 세 가지 정보를 추정하는 방법을 제안하였다. 제안된 기법의 유효성과 성능을 실험을 통해 확인하였으며, 제안된 기법이 기존 기법보다 보행자의 실제 이동 방향과 위치를 더욱 정확하게 추정하였음을 확인할 수 있었다. 다만, 동일한 보행자일지라도 보행 속도가 달라짐으로 인한 보폭의 편차가 존재하며, 보행자마다 보행 특성이 달라 위치 추정 오차를 발생시킬 수 있어 향후 이런 특성을 고려한 후속 연구를 수행하고자 한다. 또한 스마트폰을 주머니에 넣거나 한 손에 쥐고 걷는 등의 다양한 자세에서도 보행자의 위치 추정 성능을 향상시킬 수 있는 연구를 수행하고자 한다.

Acknowledgement

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea Government (MSIT) (NRF-2019R1F1A1049677 and NRF-2021R1F1A1049509). The present research has been conducted by the Excellent researcher support project of Kwangwoon University in 2021.

**Fig. 13.** Experiment result for 2nd case

References

- [1] Beauregard, S., Haas, H. (2006). "Pedestrian dead reckoning: A basis for personal positioning." Proceeding of the 3rd Workshop on Positioning, Navigation and Communication (WPNC '06), Hannover, Germany, pp. 27-35.
- [2] Bisio, I., Cerruti, M., Lavagetto, F., Marchese, M., Pastorino, M., Randazzo, A., Sciarrone, A. (2014). "A trainingless wifi fingerprint positioning approach over mobile devices." IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, Vol. 13, pp. 832-835.
- [3] Deak, G., Curran, K., Condell, J. (2012). "A survey of active and passive indoor localisation systems." Computer Communications, Vol. 35, pp. 1939-1954.
- [4] Fischer, C., Gellersen, H. (2009). "Location and navigation support for emergency responders: A survey." Pervasive Computing, IEEE, Vol. 9, No. 1, pp. 1536-1268.
- [5] Harle, R. (2013). "A survey of indoor inertial positioning systems for pedestrians." IEEE Communications Survey & Tutorials, Vol. 15, No. 3, pp. 1281-1293.
- [6] Kim, N., Jo, U., Yun, K., Jeon, H., Kim, Y. (2015). "A hybrid positioning scheme exploiting sensors and RSS of Wi-Fi signals." Wireless Personal Communications, Vol. 85, No. 3, pp. 1111-1121.
- [7] Kuutti, S., Fallah, S., Katsaros, K., Dianati, M., Mccullough, F., Mouzakitis, A. (2018). "A survey of the state-of-the-art localization techniques and their potentials for autonomous vehicle applications." IEEE Internet of Things Journal, Vol. 5, No. 2, pp. 829-846.
- [8] Park, S., Lee, J.H., Park, C.G. (2021). "Robust pedestrian dead reckoning for multiple poses in smartphones." in IEEE Access, Vol. 9, pp. 54498-54508.
- [9] Talvitie, J., Sydanheimo, L., Lohan, E., Ukkonen, L. (2015). "Hybrid WLAN-RFID indoor localization solution utilizing textile tag." IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, Vol. 14, pp. 1358-1361.
- [10] Valenti, R.G., Dryanovski, I., Xiao, J. (2015). "Keeping a good attitude: A quaternion-based orientation filter for IMUs and MARGs." Sensors, Vol.15, No.8, pp. 19302-19330.
- [11] Villania, V., Pini, F., Leali, F., Secchi, C. (2018). "Survey on human - robot collaboration in industrial settings: Safety, intuitive interfaces and applications." Mechatronics, Vol. 55, pp. 248-266.
- [12] Zhou, B., Kim, N., Kim, Y., (2016). "A passive indoor tracking scheme with geometrical formulation." IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, Vol. 15, pp. 1815-1818.