

저가형 관성 센서를 이용한 실내 보행자 위치 추정 알고리즘

박찬국, 박소영
서울대학교

요약

본고에서는 저가형 관성 센서를 이용하여 실내 항법을 수행하는 여러 방법들에 대해 알아본다. 저가형 관성 센서를 이용한 추측 항법은 휴대성이 뛰어나고 외부의 인프라 없이 구현이 가능하고 가격이 저렴하다는 장점이 있지만, 오차가 빠르게 누적된다는 단점이 있다. 이를 해결하기 위해 사용자의 보행 특성을 이용한 보행자 추측 항법이 제안되었다. 본고에서는 보행자 추측 항법의 두 분류 기법인 걸음-이동방향 결합 기법과 관성 항법-영속도 보정 결합 기법의 원리와 각 기법들의 기술 동향에 대해 다루고자 한다.

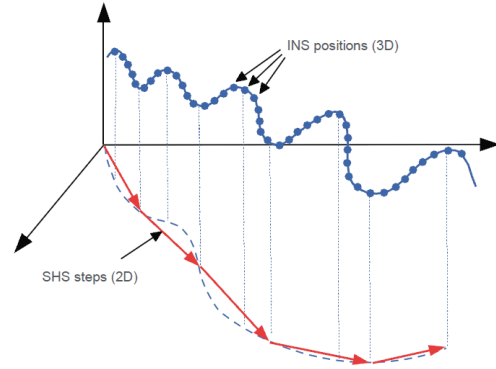


그림 1. 관성항법-영속도 보정 결합 기법(INS-ZUPT)과 걸음-이동방향 결합 기법(SHS) [7]

I. 서론

실외에서는 GPS 측정치를 이용해 정확한 위치 추정을 할 수 있는 반면, 실내에서는 GPS 신호가 약해 사용자의 정확한 위치 정보를 얻을 수 없기에 다른 정보를 이용하여 사용자의 위치를 추정한다. 측정 방법에 따른 실내 사용자 위치 추정의 방법들은 크게 다음의 네 방법으로 나눌 수 있다. 이는 현장 탐지(direct-sensing) 기반 기법, 삼각 측량(triangulation) 기반 기법, 패턴 인식(pattern-recognition) 기반 기법, 그리고 추측 항법(dead reckoning) 기반 기법이다[1].

현장 탐지 기반 위치 추정 기법은 주변 환경에 식별 장치(identifiers)나 태그(tag)를 장착하여 사용자의 위치를 결정하는 방법이다. 대표적 방법은 전파 식별 리더기(RFID), 적외선(IR), 초음파, 블루투스 비콘(beacon), 바코드이며 주된 단점으로는 사용자가 추가적인 기기를 들고 다녀야 하거나 주변 환경에 필요한 기기들을 미리 설치해야 한다는 단점이 있다[2]-[6].

삼각 측량 기반 기법은 하나의 식별 장치를 사용하는 현장 탐지 기반 기법과 달리 다중 식별 장치를 사용하고 삼각 측량을 통해 위치를 추정한다. 대표적으로 사용되는 장치는 전파 식별 리더기, 적외선, 초음파이며 위치를 추정하기 위해 최소한 3개

이상의 식별 장치 정보가 필요하다. 현장 탐지 기반 기법과 삼각 측량 기반 기법을 이용하여 위치 추정을 수행하기 위해서는 인프라의 구성이 필요하며, 또한 알고 있는 위치에 비콘을 설치해야 한다. 그러나 건물의 구조, 장착 위치를 기반으로 하는 방법의 경우에는 환경의 변화에 따라 위치 정확도가 달라지며 새로운 환경에서 위치 추정을 할 경우 초기 장착 시간이 요구된다는 단점이 존재한다.

다음으로 하나 이상의 센서를 이용해 수집한 데이터와 사전에 수집한 센서 데이터 비교를 통해 사용자의 위치를 추정하는 방법을 패턴 인식 기반 기법이라고 한다. 수집한 센서 데이터의 경우에는 휴대폰의 카메라 영상을 이용한 컴퓨터 비전(computer vision) 기법, 무선 랜(WLAN) 신호나 관성 센서를 이용하여 지도를 만드는 지문(fingerprinting) 기법이 대표적이다. 이러한 패턴 인식 기반 기법들은 모델 학습(model training) 과정이 복잡하거나 많은 시간이 걸리며, 학습된 데이터가 많아질수록 많은 저장 공간 및 계산량이 요구된다[8].

마지막으로 추측 항법 기반은 외부의 도움 없이 센서만을 이용하여 이전의 위치를 기반으로 사용자의 현재 위치를 파악하는 방법이다. 대표적으로 가속도 센서, 자이로 등을 이용하는 방법이 있으며 휴대성이 뛰어난 반면 저가형 센서를 사용할 경우, 오차가 빠르게 누적된다는 단점이 있다[9].



그림 2. 걸음-이동방향 결합기법(SHS) 구성요소

본고에서 주로 다루게 될 내용은 추측 항법을 기반으로 한 실내 위치 추정 기법이며, 그 중에서도 보행자 추측 항법(PDR, Pedestrian Dead Reckoning)을 이용한 방법에 대해 상세히 다루고자 한다. 보행자 추측 항법은 크게 <그림 1>과 같이 관성 항법-영속도 보정 결합 기법(INS-ZUPT, Inertial Navigation System -Zero velocity UPdaTe)과 걸음-이동방향 결합 기법(SHS, Step-and-Heading System)로 분류할 수 있다. 본고에서는 이 두 기법들에 대한 설명과 정확도를 높이기 위한 여러 기법들에 대해 다루고자 한다.

본고의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 걸음-이동방향 결합 기법에 대해 다루고, 3장에서는 관성 항법-영속도 보정 결합 기법에 대해 다룬다. 그리고 4장에서 결론을 맺는다.

II. 걸음-이동방향 결합 기법

걸음-이동방향 결합 기법은 크게 <그림 2>와 같이 걸음 검출, 보폭 추정, 이동 방향 추정의 세 과정으로 구성된다.

1. 걸음 검출 기법

걸음 검출 기법은 보행자가 이동을 할 때, 걸음이 주기적으로 반복된다는 보행 특성을 이용하여 그 주기를 판별하는 기법으로 보행자 추측 항법에서 가장 기본적으로 요구되는 과정이며 검출이 제대로 되지 않을 경우 큰 이동 거리 오차를 유발하기 때문에 동시에 높은 정확도를 필요로 한다. 일반적으로 많이 사용되는 방법으로는 <그림 3>에서 나타난 것과 같이 최대치 검출 기법(peak detection), 영교차 검출 기법(zero-crossing detection), 일정 구간 검출 기법(flat zone detection), 그리고 자기 상관 기법(auto correlation) 기법이 있다[9]. 최대치 검출 기법은 주어진 구간에서 가속도에 신호의 최대 값을 검출하는 방법으로 임계치를 기준으로 걸음을 검출한다[10]. 이 방법은 관성 센서가 보행자의 신발에 부착되어있을 때 효과적으로 걸음을 검출할 수 있으며, 사용자나 주변 환경에 따라 변화되는 임계치를 설정해야 한다는 단점이 있다. 영교차 검출 기법은 가

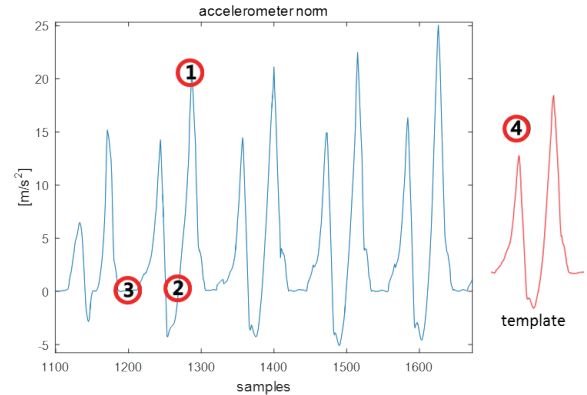


그림 3. 걸음 검출 기법
 ①최대치 검출 기법, ②영교차 검출 기법,
 ③일정구간 검출 기법 ④자기 상관기법

속도 신호의 영점 교차 부분을 검출하는 것으로 알고리즘 구성이 용이하다는 장점이 있지만 영점 근처 신호 떨림 현상에 대한 고려가 필요하다. 다음으로 가속도의 기울기 변화가 없는 부분을 검출하는 것을 일정 구간 검출 기법이라고 하며, 다리가 지면에 닿아있는 구간을 검출하는 기법이기 때문에 센서가 신발에 부착되어 있는 경우에만 적용될 수 있다는 단점이 있다[11]. 자기 상관 기법은 시간 영역에서 걸음 표본(template)을 이용하여 걸음을 검출하는 기법이다[12]. 그 밖에도 주파수 분석을 이용한 걸음의 주기적 특성을 이용해 걸음을 검출을 하는 방법이 있다[13]. 자기 상관 기법과 주파수 분석 기법은 걸음 속도가 달라지는 경우에 사용이 어렵다는 단점이 있다.

언급한 걸음 검출 기법들은 센서가 고정된 위치에 장착되어 있을 때 효과적으로 사용할 수 있으나, 휴대 전화를 이용한 실내 보행 항법의 경우에는 사용자가 이동을 하면서 기기를 손에 들고 걷기, 문자 보내기, 통화 하기, 바지 주머니에 기기를 넣고 걷기, 기기를 가방에 넣고 걷기 등의 다양한 상황들이 존재하므로 기계 학습 기법을 이용하여 장착 위치 인식과 걸음 검출 알고리즘을 결합한 알고리즘들도 많이 제안되고 있다[9].

2. 보폭 추정 기법

보폭은 한 걸음에서의 이동거리를 의미하며, 보행자 추측 항법에서는 보폭을 누적하여 보행자의 이동거리를 파악한다. 일반적으로 많이 사용하는 보폭 추정 요소는 사용자의 걸음 주파수 (walking frequency)와 가속도 분산 (acceleration variance)를 사용하는 것이다. 두 요소는 <그림 4>와 같이 보폭과 선형 관계에 있어 식 (1)과 같이 선형식을 세워 보폭을 추정할 수 있다.

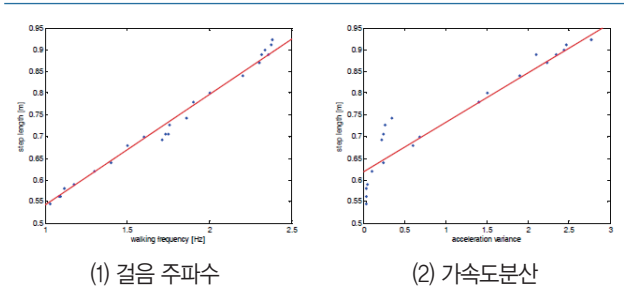


그림 4. 보폭과 (1)걸음 주파수 (2)가속도분산 관계

$$\text{Step Length} = \alpha \cdot f + \beta \cdot v + \gamma \quad (1)$$

관성 센서를 적분하여 보폭을 추정하면 오차가 누적되지만 이 방법을 사용하면 걸음 주파수와 분산에만 영향을 받기 때문에 오차가 누적되지 않는다는 장점이 있다. 그 밖에도 보폭 추정 요소에 사용자의 키, 나이, 성별 등의 신체적 조건을 이용하는 방법이 있으며[14], 보폭 추정 요소를 가지고 선형 기법이 아닌 다른 상관 관계식을 구성하여 보폭을 추정하는 방법들도 있다 [10][15][16][17]. 또한 단순히 사용자의 동작들에 따라 고정된 보폭 값을 사용하는 방법[18], 광학 흐름(Optical flow)[19], 동작에 따른 적응 보폭 추정[20], 순환 최소 자승(recursive least square)를 사용하는 기법 등 다양한 방법들이 있다[21].

3. 이동 방향 추정 기법

저가형 자이로만을 이용하여 이동 방향을 추정하게 되면 큰 오차가 발생하므로, 보행자 추측 항법에서는 지자기 센서를 이용하여 이동 방향을 추정한다. 지자기 센서는 지구 자기장을 측정하는 센서로 이동 방향을 계산할 수 있지만, 센서가 장기간 주변 환경에 의한 영향을 받게 되면 정확도가 크게 떨어지게 된다. 실내에서 보행을 수행할 때, 지자기 센서는 주변 환경에 의한 강철(hard iron)과 연철(soft iron) 효과로 오차를 가지게 된다. 강철 효과는 영구적인 자기장 외란을 생성하는 물체에 의해 발생하며 그러한 물체는 자기장에 바이어스 오차로 영향을 준다. 연철 효과는 강철 효과보다 복잡한 자기장 외란을 생성하는데 주로 강자성체(ferromagnetic material)에 의해 발생하며 지구 자기장과의 상호 작용에 의해 자기장의 방향을 바꾼다.

이러한 관성 센서 출력값과 지자기 센서 측정치를 사용하여 실내에서 기기의 이동 방향 및 위치를 추정하는 방법은 크게 4가지로 나눌 수 있다. 첫 번째는 자기장 자체를 이용해서 사용자의 위치를 판별하는 지문 기법이다. 이 방법은 앞서 언급한 패턴 인식 기반 기법으로 사전에 보행할 구간에 대한 지도를 생성하는데, 실내의 여러 외란 요소들에 의해 각 위치마다 특징적

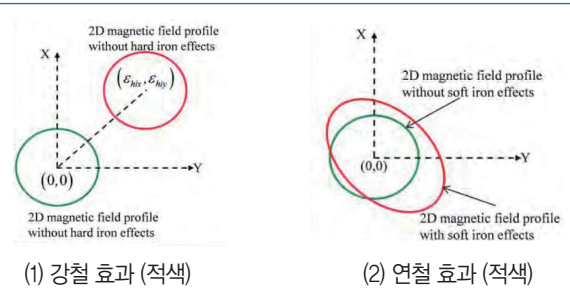


그림 5. (1)강철 (2)연철에 의한 자기장 변화[22]

인 자기장 값을 가지게 된다는 점에 착안한 방법이다. 이 방법의 경우 지도가 만들어진 구간에 대해 보행을 수행할 때 높은 위치 정확도를 가지게 되지만, 사전에 해당 위치에 자기장 지도를 만들어줘야 된다는 번거로움과 환경 변화에 따른 자기장 변화를 지도에 반영하지 않으면 위치 오차가 발생하는 단점이 있다[23]. 두 번째로는 다중 지자기 센서를 이용하여 자기장 구배(gradient)와 속도 벡터를 제하는 방법이다. 이 방법의 경우, 사전 지식을 필요로 하지 않는다는 장점이 있으나, 각 센서의 교정(calibration)이 필요하다는 것과 지자기 센서의 배치가 정확도에 큰 영향을 미치므로 휴대폰과 같이 고정되지 않은 기기는 적용할 수 없다는 단점이 존재한다[24]. 세 번째는 지구 자기장 값을 이용하는 방법으로, 현재 위치에 대한 참 지구 자기장 값 외에는 모두 외란으로 판단하여 제거하는 방법이다. 이 방법을 실내에서 사용하게 될 경우에는 지구 자기장을 변화시키는 많은 요소들이 있는데 외란 판별 방법이 매우 중요해지며 제대로 판단하지 못할 경우에 큰 오차를 유발하게 된다는 단점이 있다[25]. 마지막으로 준정적 구간(QSF, Quasi-Static magnetic Field) 검출을 통해 외란이 있는 환경에서도 자기장 측정치를 효과적으로 사용할 수 있도록 하는 방법이 있다. 이 방법은 외란이 존재하는 경우에도 준정적 구간 아래에 있으면 자기장 측정치를 사용할 수 있다는 장점이 있으나, 준정적 구간이 제대로 확보되지 않을 경우에는 자기장 측정치를 정확히 사용할 수 없다는 단점이 있다[26]. 그 밖에도 상용 스마트 기기 융합을 통한 이동 방향 추정[27] 등 스마트 기기가 다양해지고 상용화 됨에 따라 기기의 이동 방향 추정에 대한 연구는 여전히 활발하게 수행되고 있다.

III. 관성항법-영속도 보정 결합 기법

관성항법시스템에서는 관성 센서 신호를 적분하여 속도 및 자세를 구하고, 속도를 적분하여 이동한 거리를 구하여 처음 있었

던 위치로부터의 상대 위치를 구할 수 있다. 하지만 이 방법은 시간이 지남에 따라 오차가 매우 빠르게 증가하는 단점이 있다. 특히 저가형 센서를 사용하는 경우에는 센서 오차에 의해 위치 추정 정확도가 매우 떨어지게 된다. 이러한 센서 오차의 영향력을 줄이기 위해서 센서 오차가 속도, 자세, 위치 등에 미치는 영향을 필터를 이용하여 고려해 줄 수 있다. 이 때, 오차를 추정하여 보상하기 위해서는 위치 정보나 속도 정보와 같은 측정치를 필요로 한다. 관성 센서를 신발에 장착하는 경우에는 신발이 지면에 붙어있는 상황에서의 센서의 속도는 영임을 측정치로 활용할 수 있다. 관성항법-영속도 보정 결합 기법은 <그림 6>과 같이 신발이 지면에 붙어있는 디딤기(stance phase)를 검출하며 이때의 속도가 영이라는 가정을 확장칼만필터(extended Kalman filter)의 측정치로 활용하여 관성 항법에서 발생하는 오차들을 추정한다.

1. 디딤기 검출 기법

신발에 장착한 관성 센서를 이용한 보행 항법 시스템에서는 위치 추정 정확도를 높이기 위해서 영속도 구간인 디딤기를 검출해야 한다. 디딤기를 정확히 검출하지 못하는 경우 필터가 잘못된 측정치를 사용하게 되기 때문에 큰 오차가 발생하게 된다. 따라서 정확한 걸음 검출은 정확한 위치 검출에 필수적이다. 다양한 동작을 수행 할 경우에 영속도 구간을 찾는 방법에 대한 연구가 다양하게 존재한다[7]. 대표적으로 센서 신호의 여러 값들이 기준 값보다 작은 지점을 영속도 구간으로 측정하는 방법이 있다. 이 방법은 가속도계 및 자이로 신호의 크기와 분산의 크기에 따라 디딤기 판별 기준을 만들고 기준에 부합한 경우, <그림 7>과 같이 영속도 구간이라고 판단한다. 기본적인 방법이지만 걸음의 종류 따라 기준 값이 다르기 때문에 다양한 상황의 걸음에서 정확히 검출하기 어려운 문제점을 가지고 있다[28]. 하지만 일반적인 보행 상황에서는 이 방법으로 정확한 걸음 검출이 가능하기 때문에 많이 사용되고 있다.

다른 방법으로 각 걸음의 상태 사이의 확률을 이용하는 방법이다. 은닉 마르코프 모델(HMM, Hidden Markov Model)을 이용하여 최적의 걸음 상태를 구하고 이렇게 구한 걸음 상태에서 영속도 구간을 추정하는 방법이 있다[29]. 이 방법은 걸음의 주기성을 이용하기 때문에 높은 정확도를 가지나 걸음의 방향성 종류에 따라 걸음 상태 사이의 확률이 다르기 때문에 다양한 상황에서의 검출 방법으로는 부적절하다. 따라서 다양한 상황을 고려해주기 위해 기계 학습을 이용하는 알고리즘도 연구되고 있다[30].

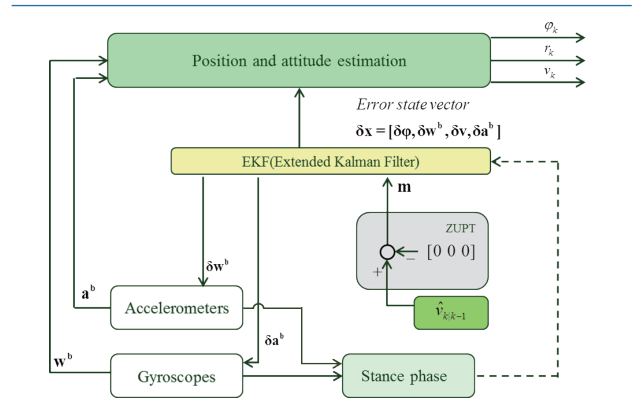


그림 6. 영속도 보정을 활용한 관성항법시스템

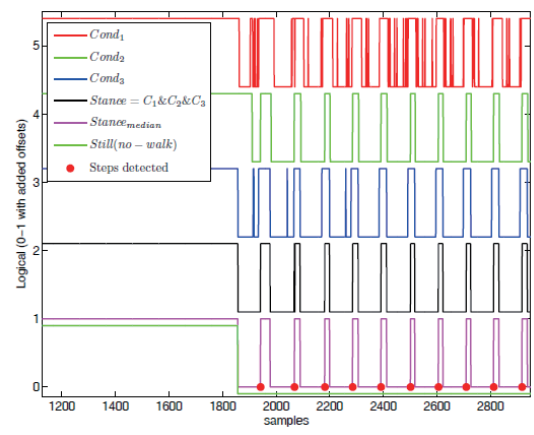


그림 7. 일반 보행에서의 디딤기 검출[28]

2. 확장칼만필터를 이용한 보행항법시스템

확장칼만필터를 이용하여 관성 항법의 오차를 추정하기 위해서는 먼저 필터의 상태변수(state)를 정해야 하며 주로 식 (2)와 같이 자세, 자이로 바이어스, 속도, 가속도계 바이어스 오차들을 상태변수로 구성한다.

$$\delta x = [\delta\phi, \delta\mathbf{b}_g, \delta\mathbf{v}, \delta\mathbf{b}_a] \quad (2)$$

필터가 실제 환경을 제대로 반영하고 있을 경우에 위치 오차를 상태변수로 고려하는 것이 위치오차 추정에 도움을 줄 수 있다. 하지만 속도오차가 측정치로 사용되는 경우, 위치오차는 가관측(unobservable)하지 않기 때문에 필터가 실제 환경을 정확하게 반영하기 힘든 보행 항법 시스템에서 위치오차를 상태변수로 사용하는 것은 위치 추정 성능이 낮아지는 요인이 될 수 있기 때문에 식 (2)에서 위치오차는 제외되었다. 확장 칼만필터를 구현하기 위해서는 시스템 모델과 측정치 모델을 필요로 하

는데 저가형 관성 센서를 사용하는 경우에는 식 (3), (4)와 같이 간단하게 표현 할 수 있다.

$$\Phi = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{3 \times 3} & \mathbf{C}_b^n \cdot dt & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{I}_{3 \times 3} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ -(\mathbf{f}_n \times) \cdot dt & \mathbf{0} & \mathbf{I}_{3 \times 3} & \mathbf{C}_b^n \cdot dt \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{I}_{3 \times 3} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\mathbf{H} = [\mathbf{0}_{2 \times 3} \quad \mathbf{0}_{3 \times 3} \quad \mathbf{I}_{3 \times 3} \quad \mathbf{0}_{3 \times 3}] \quad (4)$$

이 때 공정잡음(process noise)을 나타내는 Q값은 가속도계와 자이로의 백색 잡음(white noise)으로 설계하며 측정치 잡음(measurement noise)을 나타내는 R값은 영속도 측정치의 신뢰도에 따라 결정한다.

3. 관성항법-영속도 보정 결합 기법의 한계

일반적으로 알려진 영속도 보정을 이용한 보행항법시스템의 경우 명확한 한계점들을 가지고 있다[31]. 한계점을 가지게 되는 원인에는 다양한 동작에서 낮은 정확도를 보이는 디딤기 검출, 발이 땅에 닿아 있더라도 실제로는 영속도 구간이 없는 상황, 발이 땅에 닿는 순간 빠르고 크게 변화하는 각속도 및 가속도 등이 있다.

먼저 다양한 동작을 수행하는 경우에는 앞서 언급한 바와 같이 기준 값을 사용하는 방법만으로는 디딤기 검출이 어렵다. 일반적인 보행과는 달리 계단을 오르내리기, 앉아서 걷기, 옆으로 걷기 등의 동작을 수행하는 경우에는 관성 센서에서의 신호 패턴이 다르게 나타나며 실제로 지지 발이 움직이기도 하는 상황이 생기기 때문에 정확한 디딤기 검출이 어려운 경우가 발생한다.

달리기를 수행하는 경우나 계단 오르내리기 상황에서는 신발이 지면에 닿아 있더라도 계속해서 움직이기 때문에 영속도 가정의 정확도가 떨어지는 경우도 발생한다. 즉, 디딤기를 검출 하더라도 영속도 가정과는 맞지 않기 때문에 추가적인 오차가 발생할 수 있다. 따라서 다양한 동작 상황에서 보행항법시스템을 구현하고자 할 경우, 이러한 문제에 대한 연구가 필요하다.

신발이 지면에 닿을 때 발생하는 충격 또한 관성항법시스템 오차에 큰 영향을 주게 된다. 이는 관성 항법에 사용되는 센서의 불충분한 대역폭 때문에 발생하게 되는데, 센서에 충격이 발생하는 상황에서 순간적으로 큰 가속도 및 각속도 변화가 발생하게 된다. 일반적으로 항법에서 사용되는 센서의 경우 30~40Hz의 대역폭을 가지고 있는데 충격이 발생할 때 실제로

는 100Hz이상의 주기가 빠른 신호가 들어오기 때문에 센서에서 실제 가속도 및 각속도 값을 측정하지 못한다. 따라서 이를 적분하는 관성항법시스템에는 고려하지 못한 오차가 누적되어 속도, 자세 및 위치 정확도에도 영향을 미치며 필터가 이를 고려해주지 못하기 때문에 더 큰 오차를 발생시킬 수 있다.

실제로 다양한 대상자에게 유용한 보행항법 시스템 개발 및 상용화 과정을 거치기 위해서는 다양한 동작 상황을 고려해야 하며 이러한 한계점들을 극복하기 위한 알고리즘에 대한 연구도 진행되고 있다[32].

IV. 결론

본고에서는 저가형 관성 센서를 이용한 실내 보행자 추측 항법에 대해 알아보았다. 실내 보행자 추측 항법은 크게 걸음-이동방향 결합 기법과 관성 항법-영속도 보정 결합 기법으로 나눌 수 있다. 우선 걸음-이동방향 결합 기법은 걸음 검출, 보폭 추정, 이동 방향의 세 단계로 구성되고, 관성 항법-영속도 보정 결합 기법은 걸음 검출 및 영속도를 필터의 측정치로 사용하여 오차를 보정하고 사용자의 위치를 추정함으로써 저가형 관성 센서로는 구현할 수 없는 정확도를 보행자 항법에서는 구현 가능함을 보였다.

Acknowledgement

본 연구는 미래창조과학부의 재원으로 정보통신기술진흥센터의 지원을 받아 수행하였음 [R0101-15-0168, 병사들에게 실전과 같은 가상훈련 환경을 제공하기 위한 전 방향 이동 지원 상호작용 소프트웨어 기술 개발]

참고 문헌

- [1] N. Fallah, I. Apostolopoulos, K. Bekris, and E. Folmer, "Indoor human navigation systems: A survey," *Interacting with Computers*, vol. 25, no. 1, pp. 21-33, 2013.
- [2] M. Youssef and A. Agrawala, "The Horus WLAN location determination system," in *Proceedings of the 3rd international conference on Mobile systems, applications, and services*, 2005, pp. 205-218: ACM.

- [3] L. M. Ni, Y. Liu, Y. C. Lau, and A. P. Patil, "LANDMARC: indoor location sensing using active RFID," *Wireless networks*, vol. 10, no. 6, pp. 701–710, 2004.
- [4] A. Ward, A. Jones, and A. Hopper, "A new location technique for the active office," *IEEE Personal communications*, vol. 4, no. 5, pp. 42–47, 1997.
- [5] R. Want, A. Hopper, V. Falcao, and J. Gibbons, "The active badge location system," *ACM Transactions on Information Systems (TOIS)*, vol. 10, no. 1, pp. 91–102, 1992.
- [6] J. Hallberg, M. Nilsson, and K. Synnes, "Positioning with bluetooth," in *Telecommunications, 2003. ICT 2003. 10th International Conference on*, 2003, vol. 2, pp. 954–958: IEEE.
- [7] R. Harle, "A Survey of Indoor Inertial Positioning Systems for Pedestrians," *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 15, no. 3, pp. 1281–1293, 2013.
- [8] M. J. Leach, E. P. Sparks, and N. M. Robertson, "Contextual anomaly detection in crowded surveillance scenes," *Pattern Recognition Letters*, vol. 44, pp. 71–79, 2014.
- [9] A. Brajdic and R. Harle, "Walk detection and step counting on unconstrained smartphones," in *Proceedings of the 2013 ACM international joint conference on Pervasive and ubiquitous computing*, 2013, pp. 225–234: ACM.
- [10] J. W. Kim, H. J. Jang, D.-H. Hwang, and C. Park, "A step, stride and heading determination for the pedestrian navigation system," *Positioning*, vol. 1, no. 08, p. 0, 2004.
- [11] S. Y. Cho and C. G. Park, "MEMS based pedestrian navigation system," *Journal of navigation*, vol. 59, no. 01, pp. 135–153, 2006.
- [12] A. Rai, K. K. Chintalapudi, V. N. Padmanabhan, and R. Sen, "Zee: Zero-effort crowdsourcing for indoor localization," in *Proceedings of the 18th annual international conference on Mobile computing and networking*, 2012, pp. 293–304: ACM.
- [13] P. Barralon, N. Vuillerme, and N. Noury, "Walk detection with a kinematic sensor: Frequency and wavelet comparison," in *Engineering in Medicine and Biology Society, 2006. EMBS'06. 28th Annual International Conference of the IEEE*, 2006, pp. 1711–1714: IEEE.
- [14] Y. Murata, K. Kaji, K. Hiroi, and N. Kawaguchi, "Pedestrian dead reckoning based on human activity sensing knowledge," in *Proceedings of the 2014 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing: Adjunct Publication*, 2014, pp. 797–806: ACM.
- [15] H. Weinberg, "Using the ADXL202 in pedometer and personal navigation applications," *Analog Devices AN-602 application note*, vol. 2, no. 2, pp. 1–6, 2002.
- [16] J. Scarlett, "Enhancing the performance of pedometers using a single accelerometer," *Application Note, Analog Devices*, no. AN-900, 2007.
- [17] W. Kang and Y. Han, "SmartPDR: Smartphone-based pedestrian dead reckoning for indoor localization," *IEEE Sensors journal*, vol. 15, no. 5, pp. 2906–2916, 2015.
- [18] M. Alzantot and M. Youssef, "UPTIME: Ubiquitous pedestrian tracking using mobile phones," in *Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2012 IEEE*, 2012, pp. 3204–3209: IEEE.
- [19] J. Qian, L. Pei, J. Ma, R. Ying, and P. Liu, "Vector graph assisted pedestrian dead reckoning using an unconstrained smartphone," *Sensors*, vol. 15, no. 3, pp. 5032–5057, 2015.
- [20] S. H. Shin and C. G. Park, "Adaptive step length estimation algorithm using optimal parameters and movement status awareness," *Medical engineering & physics*, vol. 33, no. 9, pp. 1064–1071, 2011.
- [21] V. Renaudin, M. Susi, and G. Lachapelle, "Step length estimation using handheld inertial sensors," *Sensors*, vol. 12, no. 7, pp. 8507–8525, 2012.
- [22] M. H. Afzal, "Use of Earth's magnetic field for pedestrian navigation (no. 05). 2011.
- [23] J. Haverinen and A. Kemppainen, "Global indoor self-localization based on the ambient magnetic field," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 57,

- no. 10, pp. 1028–1035, 2009.
- [24] D. Vissiere, “Guidance navigation and control solutions for unmanned heterogeneous vehicles during a collaborative mission,” *École Nationale Supérieure des Mines de Paris*, 2008.
- [25] D. Roetenberg, H. J. Luinge, C. T. Baten, and P. H. Veltink, “Compensation of magnetic disturbances improves inertial and magnetic sensing of human body segment orientation,” *IEEE Transactions on neural systems and rehabilitation engineering*, vol. 13, no. 3, pp. 395–405, 2005.
- [26] V. Renaudin and C. Combettes, “Magnetic, acceleration fields and gyroscope quaternion (MAGYQ)-based attitude estimation with smartphone sensors for indoor pedestrian navigation,” *Sensors*, vol. 14, no. 12, pp. 22864–22890, 2014.
- [27] D. Loh, S. Zihajehzadeh, R. Hoskinson, H. Abdollahi, and E. J. Park, “Pedestrian Dead Reckoning With Smartglasses and Smartwatch,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 16, no. 22, pp. 8132–8141, 2016.
- [28] A. R. Jiménez, F. Seco, J. C. Prieto, and J. Guevara, “Indoor pedestrian navigation using an INS/EKF framework for yaw drift reduction and a foot-mounted IMU,” in *Positioning Navigation and Communication (WPNC), 2010 7th Workshop on*, 2010, pp. 135–143: IEEE.
- [29] S. K. Park and Y. S. Suh, “A zero velocity detection algorithm using inertial sensors for pedestrian navigation systems,” *Sensors*, vol. 10, no. 10, pp. 9163–9178, 2010.
- [30] S. Y. Park, H. Ju, and C. G. Park, “Stance Phase Detection of Multiple Actions for Military Drill Using Foot-mounted IMU,” *sensors*, vol. 14, no. 15, p. 16, 2016.
- [31] J.-O. Nilsson, I. Skog, and P. Händel, “A note on the limitations of ZUPTs and the implications on sensor error modeling,” in *2012 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, 13–15th November 2012, 2012.
- [32] H. Ju, M. S. Lee, S. Y. Park, J. W. Song, and C. G. Park, “A pedestrian dead-reckoning system that considers the heel-strike and toe-off phases when using a foot-mounted IMU,” *Measurement Science and Technology*, vol. 27, no. 1, p. 015702, 2015.

약 력



박 찬 국

1985년 서울대학교 공학사
1987년 서울대학교 공학석사
1993년 서울대학교 공학박사
1994년~2003년 광운대학교 제어계측공학과
조교수, 부교수
2003년~현재 서울대학교 기계항공공학부 교수
관심분야: 관성항법, 칼만 필터링, 개인항법시스템,
자세추정시스템, 지형참조항법,
영상-IMU 결합항법



박 소 영

2013년 한동대학교 공학사
2013년~현재 서울대학교 기계항공공학부
박사과정
관심분야: 관성항법, 실내 항법, 자세추정시스템