creative commons
COMMONS DEED

저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

공학석사학위논문

GPS 사이클 슬립 보상을 통한 스마트폰 기반 바퀴형 이동 로봇의 정밀 항법에 관한 연구

A Study on Precise Navigation of Smartphone based Wheeled Mobile Robot with GPS Cycle Slip Compensation

2021년 2월

서울대학교 대학원

항공우주공학과

김 종 주

GPS 사이클 슬립 보상을 통한 스마트폰 기반 바퀴형 이동 로봇의 정밀 항법에 관한 연구

A Study on Precise Navigation of Smartphone based Wheeled Mobile Robot with GPS Cycle Slip Compensation

지도교수 기 창 돈

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함

2020년 12월

서울대학교 대학원
항공우주공학과
김 종 주

김종주의 공학석사 학위논문을 인준함

2020년 12월

위 원 장 _____

부위원장 _____

위 원 _____

초록

최근 스마트폰 사용자 수가 증가함에 따라 자연스럽게 스마트폰에 내장된 GPS 사용량이 증가하고 있다. 산업계에서도 이러한 상황을 반영해 스마트폰 GPS를 활용한 위치기반서비스를 구축하고 시장에 판매하고 있다. 그러나 위치기반서비스를 소비자에게 제공하기 위해서는 정밀한 수준의 항법 성능이 요구되는데 선행연구들을 살펴보면 여전히 항법 성능이 정밀하지 않은 것을 알 수 있다.

항법 성능이 저하되는 이유를 알아내기 위해서 우선 고가 GPS 안테나와 스마트폰 GPS 안테나를 비교 분석하였다. 분석 결과 스마트폰 GPS 안테나의 경우 고가 GPS 안테나와는 다르게 L1주파수 안테나와 L5주파수 안테나의 배치 위치가 다르다. 따라서 이중주파수 신호를 수신하기에 매우 환경이 열악하다. 또한 스마트폰 GPS 안테나는 Linearly Polarization 방식으로 신호를 수신 받기 때문에 Right Handed Circular Polarization (RHCP) 방식으로 방송되는 GPS 신호를 수신하기에 적합하지 않다.

또한 스마트폰 GPS 항법의 선행 연구를 살펴본 결과 동적 환경일 때 사이클 슬립이 빈번하게 발생한다고 한다. 사이클 슬립이란 신호 방해 수신 요소에 의해 반송파 위상 측정치에 미지정수 배수 만큼의 점프가 발생하는 현상으로 위치 정확도를 지속적으로 악화시킨다. 따라서 cm급 정밀 항법을 수행하기 위해서는 사이클 슬립 보상이 필수적이다.

이러한 스마트폰 GPS 안테나 특성과 선행 연구 결과를 종합하여 본 연구에서는 단일주파수 GPS 신호만을 활용한 사이클 슬립 보상 알고리즘을 제안하였다. 제안한 알고리즘의 성능을 검증하고자 시뮬레이션을 진행하였고 사이클 슬립이 잘 보상됨을 확인하였다.

GPS 신호는 1Hz 주기로 수신가능하기 때문에 GPS만 사용하게 되면 연속적인 항법 수행에 어려움이 있다. 본 연구에서는 따라서 주기가 빠르고 스마트폰에 내장되어 있는 INS를 Extended Kalman Filter (EKF)를 사용해 결합하여 항법을 수행한다. 구축한 EKF 결합항법 성능을 검증하고자 시뮬레이션을 진행하였다. 비선형 궤적을 따라 움직이는 시나리오에서 cm급 항법 성능이 나오는 것을 확인하였다.

마지막으로 제안한 알고리즘과 EKF 결합항법 시스템을 활용해 스마트폰의 주행 실험을 진행하였다. 그 결과 스마트폰이 회전할 때 사이클 슬립이 발생하여 위치 정확도가 안 좋지만 제안한 사이클 슬립 보상 알고리즘을 적용하게 되면 항법 성능이 약 60% 개선된 것을 확인하였다.

주요어 : 스마트폰 GPS, 스마트폰 INS, 안테나, GPS/INS 결합, EKF, 사이클 슬립

학 번 : 2019-23718

목 차

1장. 서 론 1

1.1 연구 동기 및 목적 1

1.2 연구 동향 5

1.3 연구 내용 및 방법 5

1.4 연구 결과의 기여도 6

2장. 단일주파수 GPS 기반 사이클 슬립 보상 알고리즘 8

2.1 Global Positioning System (GPS) 8

2.1.1 GPS 개요 8

2.1.2 GPS 측정치와 오차 요소 10

2.1.3 Carrier phase Differential GPS (CDGPS) 12

2.1.4 GPS 안테나 13

2.2 GPS 기반 사이클 슬립 보상 알고리즘 16

2.2.1 사이클 슬립 개요 16

2.2.2 제안 알고리즘 18

2.2.3 시뮬레이션 실험 환경 21

2.2.4 시뮬레이션 실험 결과 22

3장. EKF 기반 GPS/INS 결합 항법 24
3.1 Inertial Navigation System (INS) 24
3.1.1 INS 개요 24
3.1.2 INS 오차 요소 27
3.1.3 2D INS Navigation Equation 28
3.2 GPS/INS 결합항법 29
3.2.1 GPS/INS 결합항법 개요 29
3.2.2 Extended Kalman Filter (EKF) 개요 29
3.3 EKF 시뮬레이션 31
3.3.1 시뮬레이션 측정치 생성 31
3.3.2 실험 환경 33
3.3.3 실험 결과 34
4장. 실측 주행 실험 36
4.1 실험 환경 36
4.2 실험 결과 38
5장. 결론 및 향후 계획 41
참고 문헌 43
Abstract 47

List of Figures

Figure 1-1. 스마트폰에 탑재된 센서 [3] 2
Figure 1-2. 차량 자율주행을 위해 개발된 기술들 [4] 3
Figure 1-3. 주행 실험에 사용된 바퀴형 이동 로봇(Kobuki) [16] 6
Figure 2-1. GPS 위성 편대 [21] 9
Figure 2-2. GPS 구성 요소 [23] 10
Figure 2-3. Conical Spiral 안테나 [25] 14
Figure 2-4. PIFA 안테나 [26] 15
Figure 2-5. 사이클 슬립이 발생했을 때의 반송파 위상 측정치 17
Figure 2-6. 스마트폰(Xiaomi Mi9) L1/E1 안테나와 L5/E5 안테나 배치 18
Figure 2-7. LOS 벡터의 차가 가장 빠르게 변할 때 두 위성의 움직임 19
Figure 2-8. 사이클 슬립 보상 알고리즘 시뮬레이션 환경 21
Figure 2-9. 사이클 슬립 삽입에 의한 측정치 미지정수의 변화 22
Figure 2-10. 사이클 슬립 보상 전과 후의 모니터링 값 23
Figure 3-1. 2차원 Strapdown INS [28] 25
Figure 3-2. 스마트폰(Xiaomi Mi8) INS와 Kobuki 좌표계 25
Figure 3-3. 스마트폰을 Kobuki에 탑재한 모습 26
Figure 3-4. Kobuki 바퀴 측면과 밑면 28
Figure 3-5. 시뮬레이션 측정치 (GPS 및 INS) 잡음 크기 33
Figure 3-6. EKF 시뮬레이션 실험 환경 33
Figure 3-7. 시뮬레이션 주행 궤적 34

Figure 3-8. EKF 시뮬레이션 실험 결과 35
Figure 4-1. 실측 주행 실험 환경 36
Figure 4-2. 바퀴형 이동 로봇에 수신기와 안테나가 탑재된 모습 37
Figure 4-3. 실측 주행 실험 항법 결과 38
Figure 4-4. 시간에 따른 모니터링 값 추이 39
Figure 4-5. 사이클 슬립 발생 전과 후의 북쪽 위치 오차 40

1장. 서 론

1.1 연구 동기 및 목적

최근 Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)의 기술 발전으로 인한 센서 집적화와 미니멀리즘 (Minimalism) 디자인을 앞세운 애플 (Apple)의 iPhone 등장으로 스마트폰의 사용량은 크게 증가하였다 [1]. 이러한 스마트폰 성장세에 힘입어 스마트폰을 기반한 전자 상거래 (e-commerce)와 모빌리티 (Mobility) 산업이 등장했다. 쿠팡, 배달의 민족, 당근마켓, 아마존 (Amazon), 알리바바 (Alibaba)는 고객이 시장에 올 필요 없이 스마트폰 하나로 시간과 장소에 구애 받지 않고 편리하게 상품을 구매할 수 있도록 해준다. 또 카카오 T, 쏘카, 라임 (Lime), 우버 (Uber), 그랩 (Grab)은 스마트폰을 사용해 주변 택시를 호출하거나 주변에 있는 공유 차량 혹은 전동 킥보드를 사용할 수 있도록 해준다. 이들은 사용자(스마트폰)의 위치 정보를 기반하기 때문에 스마트폰의 cm급 항법 성능을 요구한다 [2]. 이를 위해 스마트폰에 탑재된 다양한 센서들이 항법 기술 개발에 많이 활용되고 있다. Figure 1-1과 같이 스마트폰 내부에 탑재된 카메라 (Camera)나 Wi-Fi 수신기 등을 활용한 정밀 항법 연구가 현재까지 많이 진행되었다.

Figure 1-1. 스마트폰 내부에 탑재된 여러 센서들 [3]

Wi-Fi 기반 항법의 원리는 다음과 같다. 스마트폰에서 수신 받은 Wi-Fi의 신호 세기를 미리 구축한 fingerprint 지도와 비교하여 현재 위치를 결정한다. 이 방식은 Wi-Fi 신호가 연속적으로 잡히는 실내 공간에서만 사용이 가능하고 Wi-Fi fingerprint 지도를 미리 구축해야 한다는 단점이 있다. 카메라 기반 항법의 원리도 비슷하다. 스마트폰에서 획득한 이미지 데이터를 미리 구축한 High Definition (HD) Map과의 비교를 통해 위치 결정을 수행할 수 있다. 하지만 이 또한 미리 지도를 구축해야 하고 태양이나 도시에서 발생하는 빛 공해로 인해 야외에서는 잡음이 포함된 이미지 데이터를 획득할 수 있어 정밀하게 위치 결정하기 어렵다. 요약하자면 Wi-Fi나 카메라의 경우 정밀 항법을 수행하기 위해서는 지도 구축이 필수적이고 실외 정밀 항법이 어렵다. 그러나 Global Positioning System (GPS)의 경우 위성으

로부터 송신된 GPS 신호를 수신 받기 때문에 실외에서도 연속적으로 신호 수신이 가능하다. 또 카메라와는 다르게 GPS의 경우 외부 빛에 강건하다.

스마트폰만큼 많은 사람들의 기대를 받고 있는 기술 중 하나가 바로 자율주행이다. 자율주행 (Autonomous Driving)이란 스스로 주행 환경을 인지하여 위험을 판단하고 주행 경로를 계획 및 제어하면서 크루즈 제어 (Cruise Control), 충돌 회피 (Collision Avoidance), 차선 이탈 방지 (Lane Departure Warning) 등을 자동으로 수행해 운전자의 주행 조작을 최소화하여 차량 스스로 안전 운행이 가능하도록 하는 기술을 의미한다.

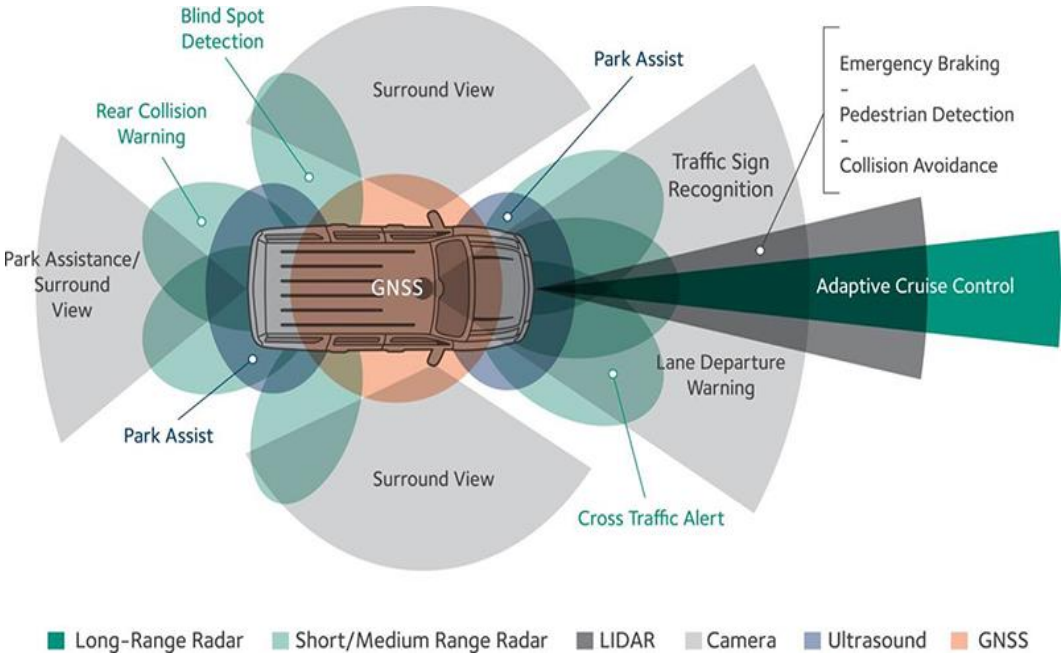

Figure 1-2. 차량 자율주행을 위해 개발된 기술들 [4]

자율주행의 상용화를 위해 많은 기업들이 기술 개발에 뛰어들고 있다. 테슬라

(TESLA), 웨이모 (Waymo), 폭스바겐 (Volkswagen) 등과 같이 단독으로 개발하거나 다임러 AG-보쉬 (Daimer AG-Bosch), 도요타-아마존 (Toyota-Amazon) 등과 같이 기업 간 협력을 통해 개발하고 있다. 국내 최고 자동차 생산 업체인 현대자동차그룹도 자율주행 기술 경쟁력을 갖추기 위해 미국의 앱티브 (Aptiv)와 합작하여 2020년 3월 모셔널 (Motional)사를 설립하였다. 이 기술은 사람이 탑승 가능한 자동차에서 축구나 야구 경기장에서 cm 크기의 선을 그리는 로봇까지 다양한 플랫폼에 적용이 가능하다. 그러나 line marking 로봇에 자율주행 기술을 적용하기 위해서는 cm급 항법이 필수적이다.

따라서 본 연구에서는 스마트폰 GPS를 사용하여 바퀴형 이동 로봇의 cm급 항법을 수행하고자 한다. GPS의 경우 1초에 한 번씩 신호를 수신 받을 수 있기 때문에 항법의 연속성을 위해 신호 수신 주기가 빠른 INS(Inertial Navigation System)을 결합하여 항법을 수행하였다.

1.2 연구 동향

2016년 Android Nougat의 출시로 스마트폰 GPS 원시 측정치 사용이 가능해졌다 [5]. 또 기존에는 스마트폰의 배터리 절약 방법으로 고안된 duty cycling이 GPS 측정치 수신에 악영향을 끼쳤으나 [6-8], 2018년 Android Pie의 출시로 스마트폰의 duty cycling 제어가 가능해졌다 [9]. 이에 GPS 측정치 기반 스마트폰 항법 연구들이 다수 진행되어왔다. 상용 수신기에 비해 스마트폰에서 얻은 측정치 Carrier-to-Noise density ratio (C/N0)가 위성의 앙각과 관계없이 변화가 심해 C/N0 크기에 비례하여 가중치를 주는 항법 연구 [10], Real-Time Kinematic (RTK)나 Precise Point Positioning (PPP)를 수행한 항법 연구가 수행되었고 [11-13], 최근에는 스마트폰 GPS의 사이클 슬립 발생 확률에 대한 분석 연구가 진행되었다 [14].

1.3 연구 내용 및 방법

본 연구에서는 스마트폰 GPS/INS 센서 기반 바퀴형 이동 로봇의 cm급 항법을 수행하였다. 우선 스마트폰 GPS의 cm급 항법 성능을 구현하고 열악한 수신환경을 가진 스마트폰 GPS 안테나 특성을 반영하여 단일주파수 GPS 기반 사이클 슬립 보상 알고리즘을 제시하였다. 제안한 알고리즘의 성능을 검증하기 위해 시뮬레이션 실험을 진행하였다.

그런 다음 기존 연구실에서 구축한 약결합 방식의 EKF를 이용하여 스마트폰 GPS/INS 결합 항법을 구현하였다 [15]. 제안한 알고리즘의 사이클 슬립 검출 및 보상 성능을 검증을 위해 우선 시뮬레이션을 진행했고 실험 결과에 대해 분석하였다. 그런 다음 Figure 1-3의 바퀴형 이동 로봇에 실제 스마트폰을 탑재하여 주행 실험을 진행하고 실험 결과에 대해 분석하였다.

Figure 1-3. 주행 실험에 사용한 바퀴형 이동 로봇(Kobuki) [16]

1.4 연구 결과의 기여도

일반적으로 사이클 슬립을 검출하고 보상할 때는 이중주파수 측정치를 사용한다 [17-18]. 그러나 스마트폰의 경우 안테나 때문에 이중주파수 측정치 사용에 한계가 있어 기존 방식을 사용하여 사이클 슬립을 검출하고 보상할 수 없다. 따라서 본 논문에서는 스마트폰 안테나를 고려한 단일 주파수 GPS 측정치 기반 사이클 슬립

보상 알고리즘을 제안하였고 이를 첫 번째 연구 기여로 볼 수 있다. 또한 본 알고리즘을 사용해 스마트폰 Carrier phase measurement DGPS (CDGPS) 항법 성능을 cm급으로 향상시켰고 이를 두 번째 연구 기여로 볼 수 있다. 기존 연구실에서는 스마트폰 Inertial Measurement Unit (IMU)와 단일주파수 GPS 수신기를 사용해 결합 항법을 수행하였으나 제안한 알고리즘을 활용해 본 논문에서는 순수 스마트폰 GPS/INS만으로 결합 항법을 수행하였고 이를 세 번째 연구 기여로 볼 수 있다.

2장. 단일 주파수 GPS기반 사이클 슬립 보상 알고리즘

2.1 Global Positioning System (GPS)

2.1.1 GPS 개요

GPS란 미국 국방부(U.S Department of Defense)에서 1973년 NAVigation System with Timing And Ranging (NAVSTAR) 프로젝트의 부분으로 개발된 위성 기반 항법 시스템을 의미한다[19]. GPS 위성은 11시간 58분을 주기로 지구를 한 바퀴 돌며 1초에 한번씩 신호를 송신한다. GPS 수신기는 위성에서 송신된 4개 이상의 신호를 수신받아 수신기의 위치를 결정한다. 위치를 결정하기 위해 우선 위성에서 신호를 송신한 시각과 수신기에서 신호를 수신 받은 시각의 차(신호 이동 시간)에 빛의 속력을 곱하여 위성과 수신기 간의 거리를 계산하여 위성을 중심으로 수신기의 위치 후보군을 1개의 구로 표현한다. 4개 이상의 위성으로부터 4개의 위치 후보군의 구를 얻어내고 이들의 교점을 최종적으로 수신기의 위치라고 결정한다[20].

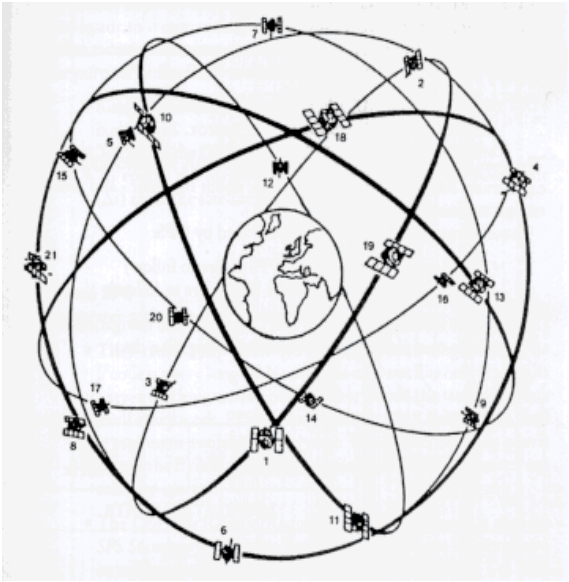

Figure 2-1. GPS 위성 편대 [21]

GPS 시스템은 Figure 2-2와 같이 크게 우주 부문 (Space Segment), 제어 부문 (Control Segment), 사용자 부문 (User Segment)로 나뉠 수 있다[15]. 우주 부문은 GPS 위성들로 구성되어 있으며 이들은 Pseudo Random Number (PRN) 코드와 항법 메시지를 Code Division Multiple Access (CDMA) 방식으로 변조하여 신호를 송신한다. 각각 위성의 경우 고유 PRN 코드를 가지고 있으며 이들은 서로 상관관계가 없어서 수신기에서 신호를 수신받을 때 자기상관함수를 활용해 신호 구분이 가능하다[22]. 제어 부문은 GPS 위성 편대를 모니터링하고 명령하고 제어하는 역할을 담당한다. 크게 Master Control Station (MCS), L-band monitor station, S-band 지상 안테나로 구성되어 있다. 사용자 부문은 GPS 수신기와 안테나를 의미한다. 위성에서 송신한 L-band 신호를 수신받아 위치를 결정하게 된다.

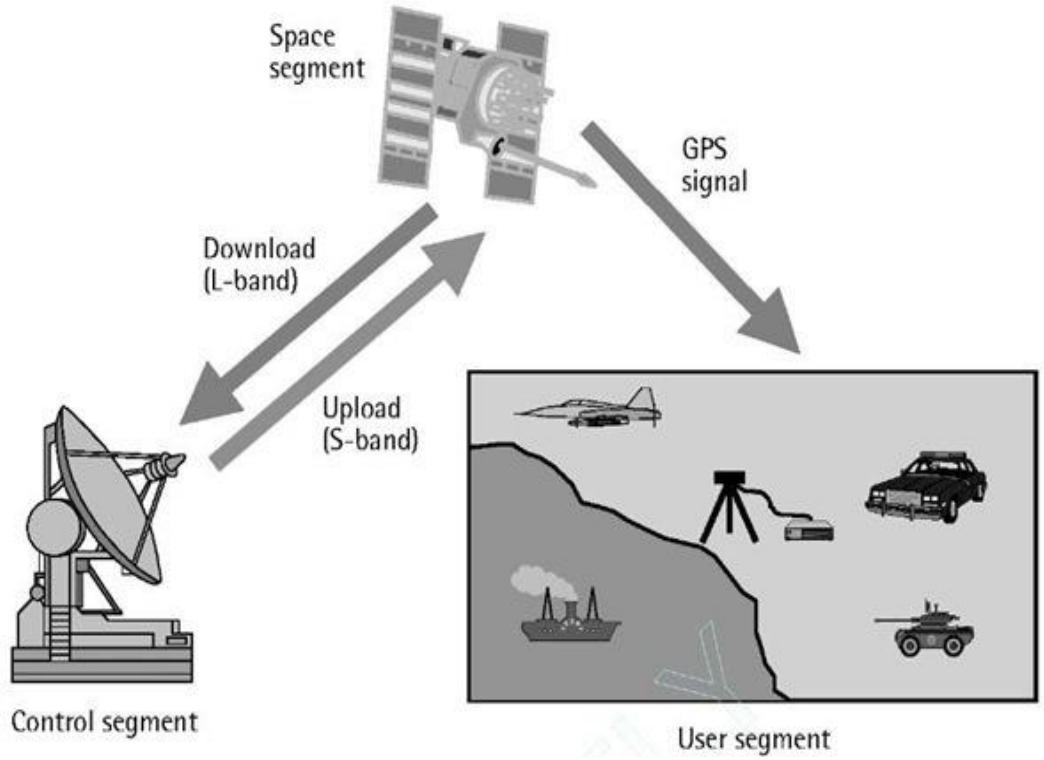

Figure 2-2. GPS 구성 요소 [23]

2.1.2 GPS 측정치와 오차 요소

GPS 측정치는 크게 의사위성 측정치, 도플러 측정치, 그리고 반송파 위상 측정치로 구분된다. 의사위성 측정치는 GPS 위성으로부터 수신기까지의 실제 거리에 여러 오차 요소가 포함되어 있다. 의사거리 측정치 ρ는 수식 (2-1)과 같이 표현된다.

$$\rho = d - b + B + T + I + M + \varepsilon_\rho \qquad (2\text{-}1)$$

여기서 d는 위성과 사용자 간의 실제 거리를, B는 수신기 시계오차를, b는 위성 시계오차를, T와 I는 각각 대류층 지연 오차와 전리층 지연 오차를, M은 의사거리 측정치에서 발생한 멀티패스 오차를 마지막으로 ε_ρ는 의사거리 측정치의 잡음을 의미한다.

도플러 측정치 $\dot{\rho}$는 수신기의 속도를 계산하는데 사용되는 측정치이다. 수식은 (2-2)와 같다.

$$\dot{\rho} = \dot{d} - \dot{b} + \dot{B} + \dot{T} + \dot{I} + \dot{\varepsilon}_\rho \tag{2-2}$$

여기서 $\dot{d}$는 위성과 사용자 간의 실제 속도를, $\dot{B}$는 수신기 시계오차의 시간 변화율을, $\dot{b}$는 위성 시계오차의 시간 변화율을, $\dot{T}$와 $\dot{I}$는 각각 대류층 지연 오차와 전리층 지연 오차의 시간 변화율을, 마지막으로 $\dot{\varepsilon}_\rho$는 의사거리 측정치의 잡음의 시간 변화율을 의미한다.

마지막으로 반송파 위상 측정치 ϕ는 수식 (2-3)과 같이 정의된다.

$$\phi = d - b + B + T - I + m + N\lambda + \varepsilon_\phi \tag{2-3}$$

여기서 m은 반송파 위상 측정치에서 발생한 멀티패스 오차를, N은 미지정수를,

λ 는 반송파 위상의 파장 길이를, 그리고 ε_ϕ 는 반송파 위상 측정치의 잡음을 의미한다. d, b, B, T, I 는 의사거리 측정치와 기호가 동일하다. 반송파 위상 측정치는 멀티패스에 강건하고 측정치 잡음이 mm 수준으로 알려져 있다. 따라서 GPS 신호를 활용해 cm급의 정밀한 항법을 수행하기 위해서는 주로 반송파 위상 측정치를 사용한다.

2.1.3 Carrier phase Differential GPS (CDGPS)

위에서 언급한 측정치를 활용한 항법 방법에는 여러 가지가 존재한다. 그 중 가까운 거리에 위치한 두 개의 GPS 수신기들을 활용해 공통의 오차요소를 제거하여 정밀한 항법을 수행하는 방법을 Differential GPS (DGPS)라고 한다. DGPS는 분류 방법에 따라 세분화 될 수 있는데 CDGPS란 그 중 반송파 위상 측정치를 사용한 DGPS를 일컫는 용어이다.

CDGPS 알고리즘은 다음과 같다. 우선 식 (2-4)와 같이 실제 위치를 알고 있는 기준국 (Reference Station)에서 수신 받은 반송파 위상 측정치와 위치를 계산하고자 하는 사용자 수신기에서 수신 받은 반송파 위상 측정치를 2번 차분하여 공통 시계오차를 제거한다. 여기서 아래 첨자 r은 기준국을, u는 사용자 수신기를 나타내며 위첨자 i와 j는 각각 GPS 위성 번호를 의미한다.

$$
\begin{aligned}
{}_r\Delta_u\phi &= {}_r\Delta_u(d + B + T - I + m + N\lambda + \varepsilon_\rho) \\
{}_r^i\nabla\Delta_u^j\phi &= {}_r^i\nabla\Delta_u^j(d + T - I + m + N\lambda + \varepsilon_\rho)
\end{aligned}
\tag{2-4}
$$

여기서 멀티패스가 발생하지 않고 기선거리가 짧다고 가정한다면 수식 (2-5)와 같이 멀티패스 오차와 대류층, 전리층 지연 오차가 제거될 수 있다.

$$ {}^{i}_{r}\nabla\Delta^{j}_{u}\phi = {}^{i}_{r}\nabla\Delta^{j}_{u}d + {}^{i}_{r}\nabla\Delta^{j}_{u}\varepsilon_{\rho} + {}^{i}_{r}\nabla\Delta^{j}_{u}N\lambda \qquad (2\text{-}5) $$

실제 거리를 알기 위해서는 미지정수를 결정해야 한다. 본 논문에서는 사용자의 위치를 알고 있다고 가정하고 수식 (2-6)과 같이 15분 이상 같은 자리에서 측정치를 수신 받고 해당 값들의 평균을 취해 미지정수 항을 계산한다.

$$ \frac{1}{N}\sum_{t=1}^{N}\nabla\Delta\phi_t = \frac{1}{N}\sum_{t=1}^{N}(\nabla\Delta d_t + \nabla\Delta\varepsilon_{\rho t} + \nabla\Delta N_t\lambda) $$
$$ \square\ \frac{1}{N}\sum_{t=1}^{N}\nabla\Delta N_t\lambda \qquad (2\text{-}6) $$

이렇게 계산된 미지정수를 이용하게 되면 사용자 수신기 위치가 변화한 후에도 Least Square Method를 사용하여 최종적으로 사용자의 위치를 계산할 수 있다 [24].

2.1.4 GPS 안테나

수신기에서 GPS 측정치들을 사용하기 위해서는 우선 위성에서 방송된 신호를 수신 받아야 한다. 이 역할을 하는 것이 바로 안테나다. 따라서 수신기의 성능과 더

불어 안테나의 성능 또한 항법에 영향을 끼칠 수 있다. GPS 위성에서 방송된 신호는 나선 형태의 Right-Handed Circular Polarization (RHCP) 편광특성을 가진다. 상용 GPS 안테나의 경우 Figure 2-3과 같이 위의 편광신호 수신에 적합하게 설계된 Conical Spiral 안테나를 사용한다.

Figure 2-3. Conical Spiral 안테나 [25]

스마트폰의 경우 그러나 좁은 공간을 활용해야 하기 때문에 상용 안테나와 같이 Conical Spiral 안테나를 사용할 수 없다. 한정된 공간을 활용하기 위해 스마트폰은 기기의 외곽부에 Figure 2-4의 Planar Inverted F-Antenna (PIFA)를 탑재하였다. PIFA는 상용 GPS와는 다르게 직선편광으로 신호를 수신한다. 따라서 위성 신호 수신 감도가 좋지 않아 상용 안테나에 비해 C/N0 값이 대략 10 dB-Hz 낮다 [10,20]. 또한 스마트폰에는 GPS 안테나 뿐만 아니라 LTE (Long Term Evolution) 안테나, 5G 안테나, Wi-Fi(Wireless Fidelity), 그리고 블루투스 안테나 또한 같이 탑재를 해야 하기 때문에 가시성이 뛰어난 공간에 GPS 안테나를 배치하기 어렵고 Figure 2-6에서 볼 수 있듯이 이중 주파수 안테나가 서로 다른 공간에 배치가 된다.

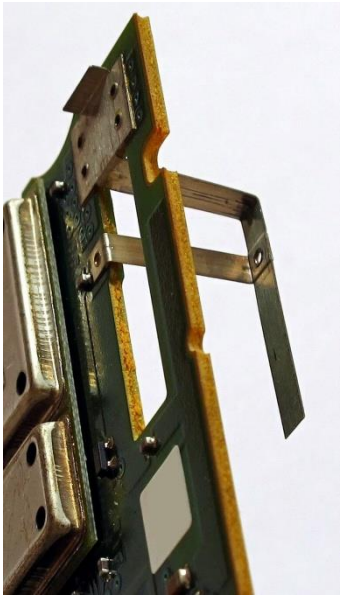

Figure 2-3. PIFA 안테나 [26]

2.2 GPS 기반 사이클 슬립 보상 알고리즘

2.2.1 사이클 슬립 개요

사이클 슬립이란 신호 수신 방해요소에 신호가 단절되고 이로 인해 수신기의 Phase Lock Loop (PLL) 과정에서 loss of lock 현상이 발생하고 최종적으로 Figure 2-4와 같이 반송파 위상 측정치에 미지정수 값의 jump가 발생하는 현상이다. 사이클 슬립이 발생하면 측정치에 바이어스 오차가 남아있어 항법 성능을 지속적으로 저하시킨다. 신호 수신 방해요소로는 건물이나 나무 등 외부적인 요소들 뿐만 아니라 보정되지 않은 안테나에 의해서도 발생할 수 있다. 따라서 반송파 위상 측정치를 사용하게 되면 사이클 슬립 발생 위험에 노출되어 있고 또 발생하게 되면 항법 성능이 저하되기 때문에 정밀 항법을 수행하기 위해서는 사이클 슬립 검출 및 보상 알고리즘이 필수적이다.

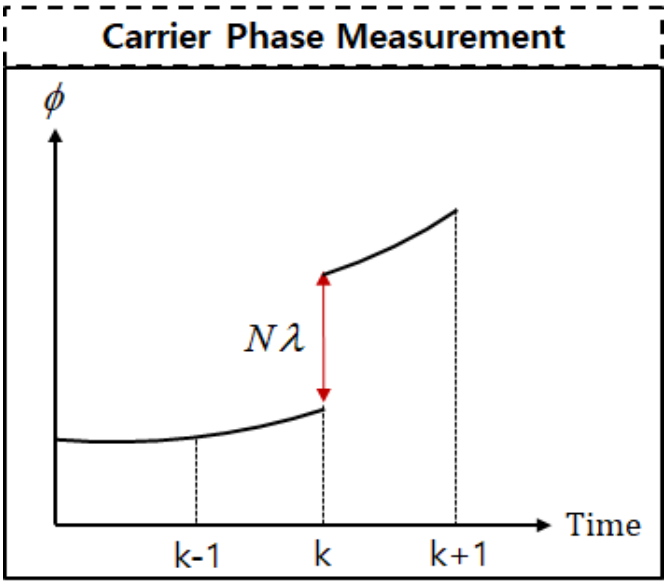

Figure 2-4. 사이클 슬립이 발생했을 때의 반송파 위상 측정치

2018년 BROADCOM®의 BCM47755 칩셋 출시로 스마트폰에서도 이중주파수 측정치 수신이 가능해졌다. 그러나 스마트폰 안테나의 경우 Figure 2-5와 같이 L1/E1 안테나와 L5/E5a 안테나가 서로 다른 공간에 위치하고 앞장에서 서술한 스마트폰 안테나 성능 저하로 인해 이중주파수 가용성에는 한계가 존재한다.

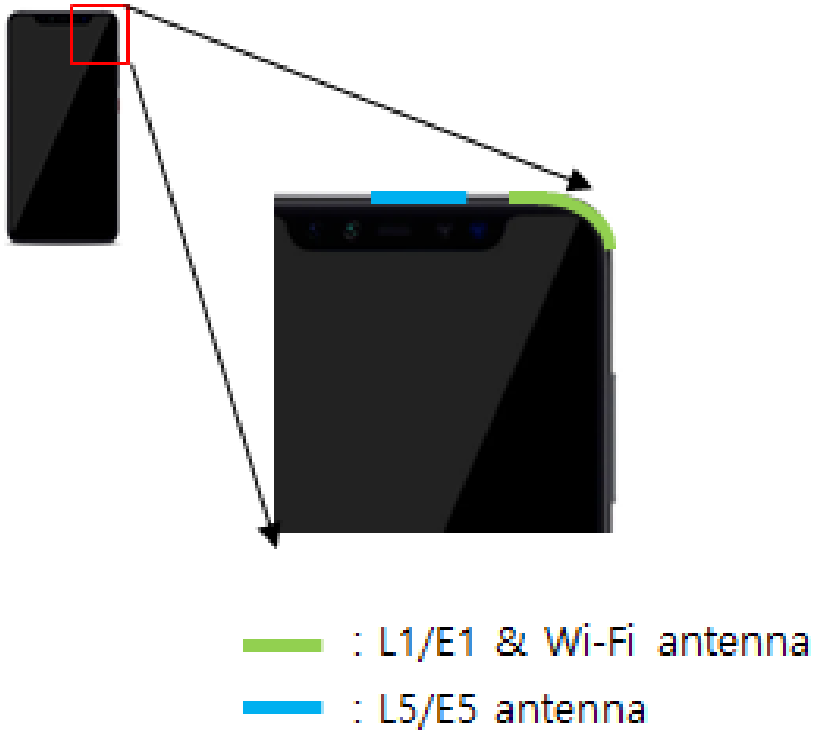

Figure 2-5. 스마트폰(Xiaomi Mi9) L1/E1 안테나와 L5/E5 안테나 배치

따라서 스마트폰 GPS의 사이클 슬립을 검출하기 위해서는 단일주파수 측정치 기반 사이클 슬립이 필수적이다.

2.2.2 제안 알고리즘

본 논문에서는 단일주파수 GPS 반송파 위상 측정치만을 활용해 사이클 슬립을 검출하고 보상하는 알고리즘을 제안하고자 한다. 위 알고리즘은 이중주파수 가용이 어려운 스마트폰 GPS를 위해 개발되었다.

알고리즘은 다음과 같다. 우선 반송파 위상 측정치의 수신기와 위성 시계오차를 이중 차분을 통해 제거해준다. 그런 다음 남아있는 미지정수 항을 제거하기 위해

시간 차분을 한다. 이렇게 시간 차분된 값을 모니터링 값으로 정의한다.

$$M = {}^{i}_{r}\nabla\Delta^{j}_{u}\delta_t\phi = {}^{i}_{r}\nabla\Delta^{j}_{u}\delta_t d + {}^{i}_{r}\nabla\Delta^{j}_{u}\delta_t\varepsilon_{\phi} \qquad (2\text{-}8)$$

모니터링 값은 수식 (2-8)과 같이 distance 항과 noise 항, 그리고 사이클 슬립에 의해 발생할 수 있는 미지정수의 변화항의 합으로 표현된다.

Threshold는 사이클 슬립이 발생하지 않았을 때의 모니터링 값의 이론적인 최대값으로 정의해준다. 이를 위해 아래와 같이 distance 항과 nosie 항을 계산해준다.

Distance 항의 최대값 계산 과정부터 살펴보면 다음과 같다. Figure 2-6와 같이 2개의 위성이 천정에 위치하고 서로 반대 방향으로 움직일 때가 Line Of Sight (LOS) 벡터의 차가 가장 빠르게 변하기 때문에 LOS의 변화량을 포함하는 distance 항이 최대가 되는 상황이다.

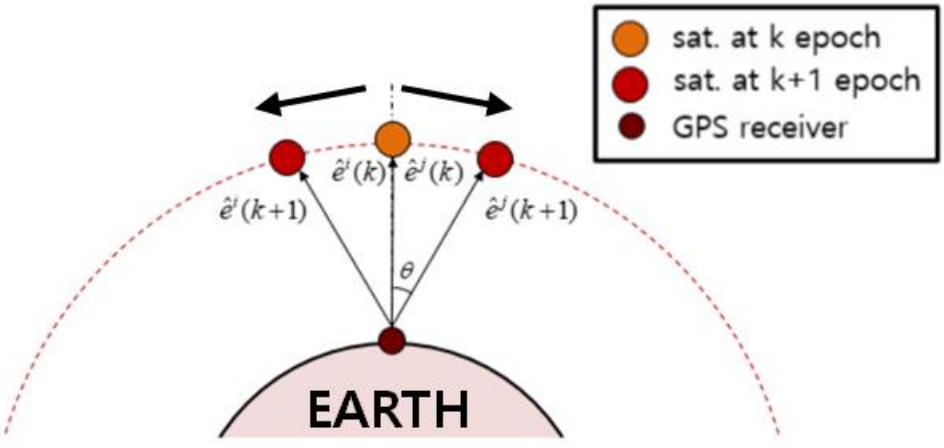

Figure 2-6. LOS 벡터의 차가 가장 빠르게 변할 때 두 위성의 움직임

이때 최대값은 아래의 수식과 같이 도출된다.

$$
\begin{aligned}
{}_{r}^{i}\nabla\Delta_{u}^{j}\delta_{t}d_{\max} &= (\bar{R}_r - \bar{R}_u)\cdot(\hat{e}^{j}(k+1) - \hat{e}^{i}(k+1)) \\
&= \left|\bar{R}_r - \bar{R}_u\right|\left|2\sin\theta\right| \\
&= (4.26\times10^{-4})\left|\bar{R}_r - \bar{R}_u\right|
\end{aligned}
\tag{2-9}
$$

다음은 Noise 항의 계산 과정이다. 모든 위성에서 수신 받은 측정치의 Noise 수준이 동일하다고 가정한다면 수식 (2-10)을 유도할 수 있고 time correlation이 없다고 가정한다면 수식 (2-11)과 같이 유도할 수 있다.

$$
\begin{aligned}
\sigma({}_{r}^{i}\nabla\Delta_{u}^{j}\varepsilon_{\phi}) &= \sqrt{\sigma(\varepsilon_{\phi_r}^{i})^2 + \sigma(\varepsilon_{\phi_r}^{j})^2 + \sigma(\varepsilon_{\phi_u}^{i})^2 + \sigma(\varepsilon_{\phi_u}^{j})^2} \\
&= \sqrt{2}(\sigma(\varepsilon_{\phi_r}) + \sigma(\varepsilon_{\phi_u}))
\end{aligned}
\tag{2-10}
$$

$$
\sigma({}_{r}^{i}\nabla\Delta_{u}^{j}\delta_{t}\varepsilon_{\phi}) = \sqrt{2}\sigma({}_{r}^{i}\nabla\Delta_{u}^{j}\varepsilon_{\phi}) \tag{2-11}
$$

Distance 항의 최대값과 Noise 항의 3σ를 더한 값을 Threshold로 정의하였다.

$$
T = ({}_{r}^{i}\nabla\Delta_{u}^{j}\delta_{t}d_{\max} + 3\sigma({}_{r}^{i}\nabla\Delta_{u}^{j}\delta_{t}\varepsilon_{\phi}))/\lambda \tag{2-12}
$$

2.2.3 시뮬레이션 실험 환경

제안한 단일주파수 GPS 기반 사이클 슬립 보상 알고리즘의 성능을 검증하고자 시뮬레이션을 진행하였다. 실험 환경은 4장에서 언급할 실측 주행 실험과 동일하게 구축하였다. 4가지 GPS 위성 신호를 사용하고 사이클 슬립은 사용자 수신기에서만 발생한다.

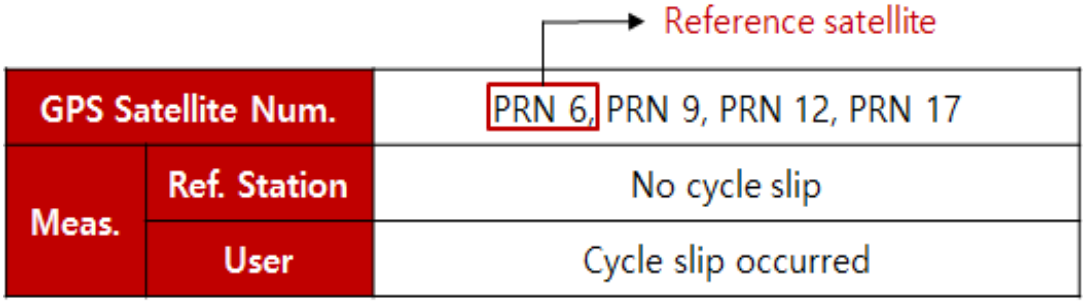

Figure 2-7. 사이클 슬립 보상 알고리즘 시뮬레이션 환경

사이클 슬립 삽입 결과는 Figure 2-8에서 미지정수의 변화로 표현하였다. 사이클 슬립을 삽입할 때 0.5 cycle단위로 삽입하였다. 그 이유는 실측 주행 실험 당시 하프 사이클 슬립이 발생하였고 또 본 알고리즘은 하프 사이클 단위의 사이클 슬립을 검출하고 보상할 수 있도록 설계하였기 때문에 이를 검출하고 보상할 수 있는지를 확인하기 위함이다.

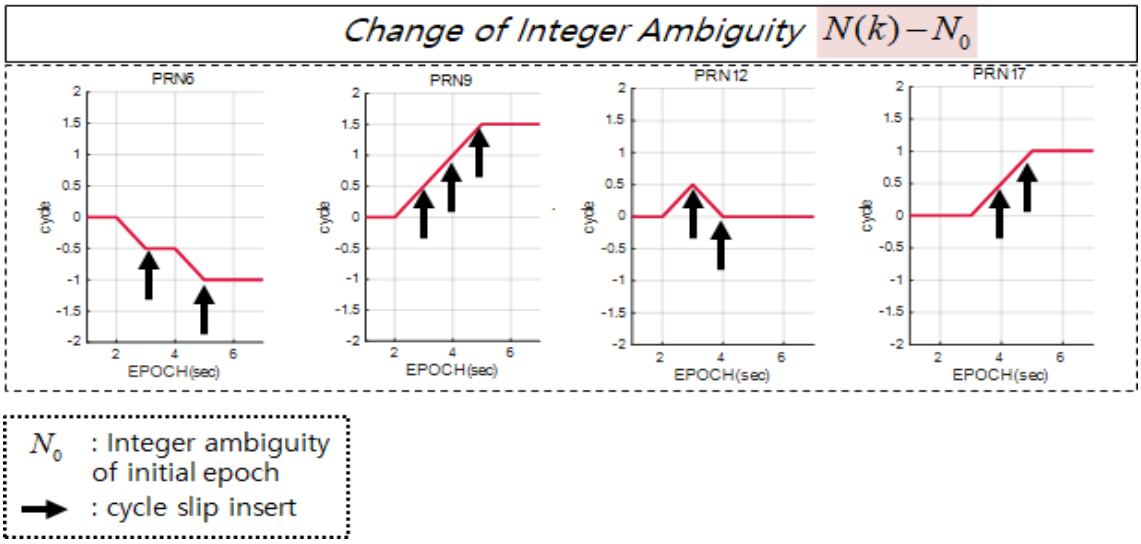

Figure 2-9. 사이클 슬립 삽입에 의한 측정치 미지정수의 변화

2.2.4 시뮬레이션 실험 결과

PRN 6번 위성을 기준 위성으로 설정하고 모니터링 값을 산출한 결과는 Figure 2-9와 같다. 9번 모니터링 값(빨간색 선)을 보면 3초에 모니터링 값이 threshold를 넘어 사이클 슬립이 검출됨을 확인할 수 있고 보상 알고리즘을 적용한 결과 사이클 슬립이 보상된 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 제안한 알고리즘을 적용하였을 때 반송파 위상 측정치에서 발생한 사이클 슬립이 검출되고 보상됨을 확인하였다. 또 figure 2-8과 같이 사이클 슬립이 발생했을 때 모니터링 값의 패턴을 확인하였고 위 결과를 활용해 4장 주행 실험과정에서 실제로 사이클 슬립이 발생했는지 검증한다.

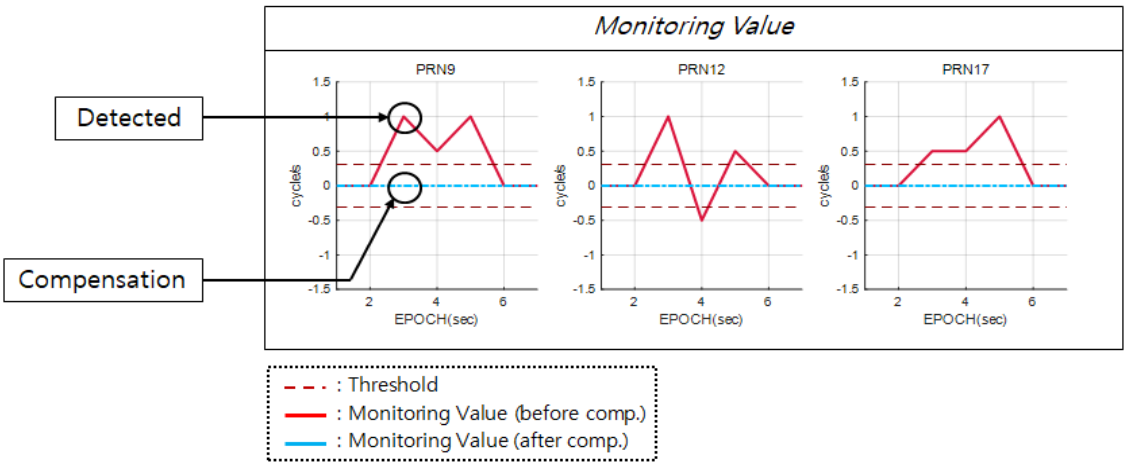

Figure 2-10. 사이클 슬립 보상 전과 후의 모니터링 값

3장. Extended Kalman Filter(EKF) 기반 GPS/INS 결합 항법

3.1 Inertial Navigation System (INS)

3.1.1 INS 개요

INS는 관성 센서인 가속도 센서와 자이로 센서를 기반으로 하는 항법 시스템이다. 하나 이상의 가속도 센서와 자이로 센서에서 획득한 선형 가속도와 자이로를 시간에 따라 적분하여 위치와 속도, 그리고 자세를 추정할 수 있다 [27]. INS는 GPS와는 다르게 외부로부터 신호를 받지 않아도 되기 때문에 날씨나 장애물 등에 영향을 받지 않고 또한 매우 빠른 주기로 자세를 추정할 수 있어 연속적인 항법이 가능하다.

INS는 짐벌 (Gimbal) 유무에 따라 Gimbaled 시스템과 Strapdown 시스템으로 구분할 수 있는데 스마트폰의 경우 이 중 소형화가 가능하고 짐벌 제어가 추가로 필요가 없는 Strapdown 시스템을 사용합니다.

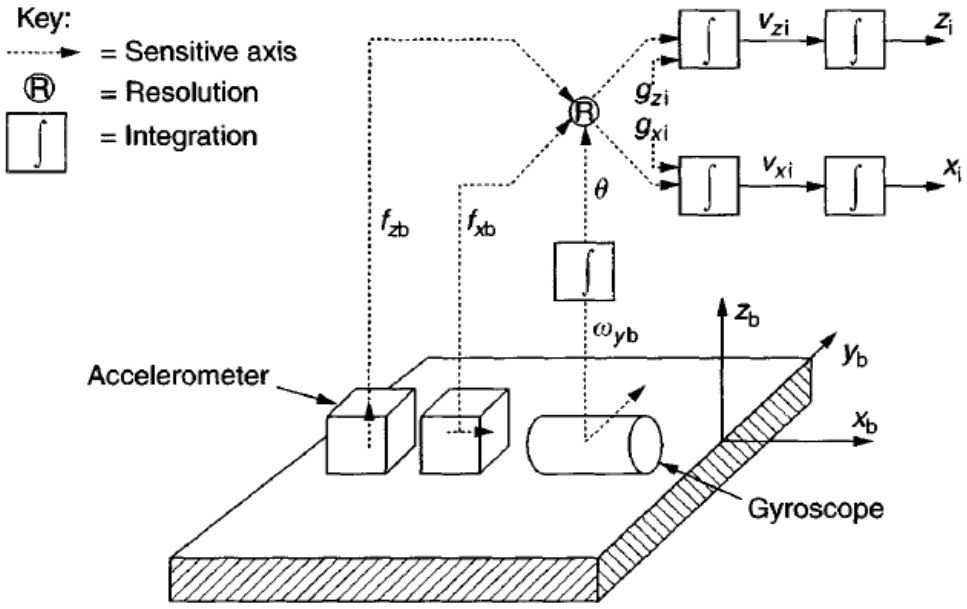

Figure 3-1. 2차원 Strapdown INS [28]

Strapdown INS를 사용하여 물체를 항법하기 위해서는 좌표변환이 필요하다. 실험 수행 과정에서 사용한 Kobuki 로봇과 스마트폰 INS 좌표계는 Figure 3-2와 같이 정의되어 있다.

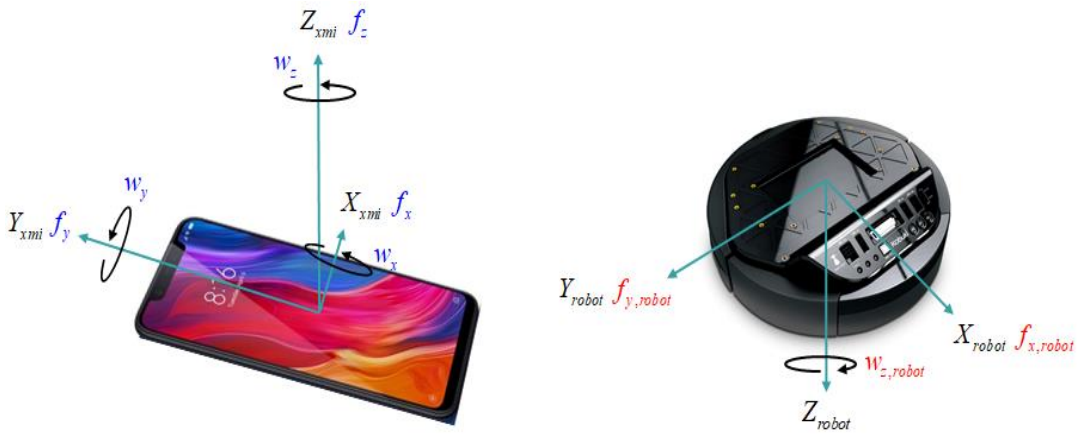

Figure 3-2. 스마트폰(Xiaomi Mi8) INS와 Kobuki 좌표계

또한 스마트폰의 안테나를 고려해 스마트폰을 Kobuki에 Figure 3-3과 같이 45도 기울인 자세로 탑재하였다. 따라서 수식 (3-1)의 좌표변환을 해야 Kobuki 항법이 가능해진다.

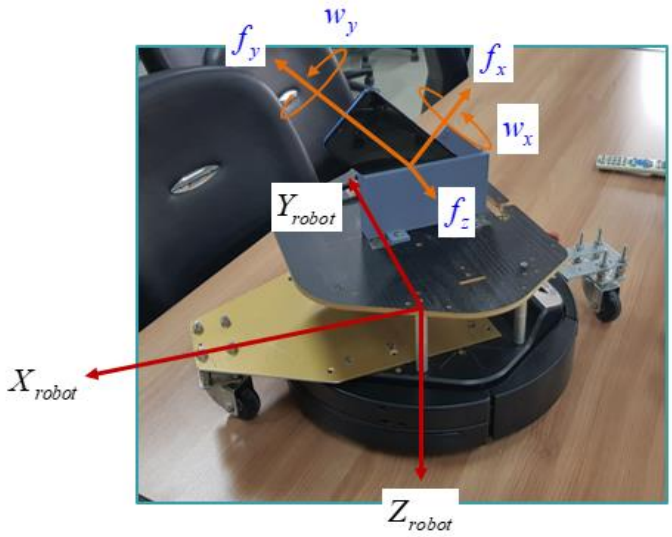

Figure 3-3. 스마트폰을 Kobuki에 탑재한 모습

$$
\begin{aligned}
f_{x,robot} &= f_y \cos\theta - f_x \sin\theta \\
f_{y,robot} &= -f_z \\
\omega_{z,robot} &= -\omega_y \sin\theta - \omega_x \cos\theta
\end{aligned}
\qquad (3\text{-}1)
$$

3.1.2 INS 오차 요소

INS를 사용하기 위해서는 발생할 수 있는 각각의 오차 요소들을 정확하게 모델링하고 이를 제거해주어야 한다. 수식 (3-2)의 측정치 모델을 보면 측정값은 실제 값과 각각의 오차 요소들이 포함된 값이라는 것을 알 수 있다. 이번 절에서는 각각의 오차 요소들에 대해 고찰하고자 한다.

$$\begin{aligned} a_{meas} &= S_a \cdot a_{true} + b_{a0} + b_a(t) + w_a \\ \omega_{meas} &= S_\omega \cdot \omega_{true} + b_{\omega 0} + b_\omega(t) + w_\omega \end{aligned} \tag{3-2}$$

S는 Scale Factor 오차를 뜻하며 실제 값의 비례 상수로써 오차가 발생한다. 본 논문에서는 오차의 크기가 매우 작기 때문에 무시한다. b는 Bias 오차를 뜻하며 INS 센서를 작동시킬 때마다 값이 달라지는 값이다. 시간에 따라 값이 변하지 않는 Constant Bias와 시간에 따라 값이 변하는 Bias Instability로 구분할 수 있다. w는 센서의 잡음을 의미한다. 가속도의 잡음은 Velocity Random Walk (VRW)라고 부르고 자이로의 잡음은 Angular Random Walk (ARW)라고 부른다 [22].

일반적으로 Bias Instability를 First-order Gauss Markov Process로 모델링을 한다. 수식 3-3과 같이 2차원에서 항법 방정식을 세울 경우 Pitch 운동에 의해 2차원에서는 고려하지 않은 중력이 가속도 센서에서 측정될 수 있다. 또한 실험을 위해 사용하는 Kobuki 로봇 바퀴의 경우 Figure 3-4와 같이 굴곡이 있어 진동이 발생하게 된다. 본 논문에서는 중력과 진동을 고려하여 바이어스와 잡음을 속도의 함수로 모델링 하였다 [15].

Figure 3-4. Kobuki 바퀴 측면과 밑면

3.1.3 2D INS Navigation Equation

일반적으로는 3차원 INS 항법 방정식을 기반으로 항법을 수행한다. 본 논문에서는 그러나 초저가에 해당하는 스마트폰 INS를 사용하고 또한 항법 대상이 지상에서 움직이는 바퀴형 이동 로봇이기 때문에 계산의 간단화를 위해 수식 (3-3)과 같이 2차원 INS 항법 방정식을 유도하였다 [15,24,29].

$$\begin{aligned} \dot{P}_N &= V_N \quad \dot{P}_E = V_E \\ \dot{V}_N &= a_x \cos\psi - a_y \sin\psi \\ \dot{V}_E &= a_x \sin\psi + a_y \cos\psi \\ \dot{\psi} &= \omega_z \end{aligned} \tag{3-3}$$

3.2 GPS/INS 결합 항법

3.2.1 GPS/INS 결합 항법 개요

2장에서는 GPS에 대한 설명을 3.1절에서는 INS에 대해 각각 설명했었다. GPS의 경우 외부에서 1Hz 주기로 송신하는 신호를 받기 때문에 오차가 누적되지 않는다. 그러나 1초에 한 번밖에 수신 받지 못해 연속적으로 항법을 수행하기 어렵고 또한 외부 장애물이나 안테나 등에 의해 신호 품질이 크게 영향을 받는다는 단점이 있다. INS의 경우 자체 탑재된 센서를 통해 항법을 수행하기 때문에 외부의 영향을 전혀 받지 않고 100Hz 이상의 빠른 주기로 신호를 수신 받기 때문에 연속적인 항법 수행이 가능하다. 그러나 앞서 설명했듯 시간에 따라 오차가 증가할 수 있다. 실제로 이러한 오차 증가로 인해 대한항공 007편 항공기가 1983년 소련의 영공을 의도치 않게 침범하였고 이로 인해 격추당하는 사건이 발생하였다 [30].

이렇듯 서로 상반된 특성을 지녔기 때문에 이 둘을 결합하여 서로의 장점만을 활용하여 항법을 수행하고자 한다.

3.2.2 Extended Kalman Filter (EKF) 개요

GPS와 INS를 결합하기 위해서는 일반적으로 칼만 필터 (Kalman Filter)를 사용해야 하고 결합 방식에 따라 약결합 (Loosely Coupled), 강결합 (Tightly Coupled), 그리고 초강결합 (Ultra Tightly Coupled)으로 분류할 수 있다. 약결합의 경우 GPS 측정치로 위치와 속도를 먼저 계산하고 이를 INS와 결합하는 방법이다. 반면 강결

합의 경우 GPS 측정치를 그대로 INS와 결합하는 방법이다. 강결합의 경우 GPS 위성의 가시위성의 수가 4개 미만이어도 항법 수행이 가능하고 반송파 위상 측정치의 미지정수 계산에 INS 측정치를 사용할 수 있고 GPS 측정치 품질을 INS 측정치로 판별할 수 있는 등 다양한 장점이 많지만 약결합에 비해 시스템이 복잡하고 계산량이 많아 일반적으로는 약결합을 사용한다 [31]. 본 연구에서는 비교적 구현이 간단하고 연산량이 적은 약결합 방식으로 칼만 필터를 구성하였다.

3.3 EKF 시뮬레이션

본 절에서는 GPS 측정치와 INS 측정치를 약결합 EKF의 항법 성능을 검증하기 위해 수행한 시뮬레이션에 대해 다루고자 한다.

3.3.1 시뮬레이션 측정치 생성

시뮬레이션을 수행하기 위해서 우선 GPS와 INS 측정치를 생성해야 한다.

GPS 측정치의 경우 수식 (3-4)와 같이 filter state에 설계한 잡음을 더하여 생성하였다.

$$\begin{aligned} P_{GPS} &= P + \nu_P \qquad \nu_P \sim N(0, \sigma_P^2) \\ V_{GPS} &= V + \nu_V \qquad \nu_V \sim N(0, \sigma_V^2) \\ \psi_{GPS} &= \psi + \nu_\psi \qquad \nu_\psi \sim N(0, \sigma_\psi^2) \end{aligned} \tag{3-4}$$

각각 측정치 잡음을 설계할 때는 Xiaomi Mi8의 실측 GPS 측정치를 기반하였다. 북쪽 방향 및 동쪽 방향 위치 측정치 잡음은 실측 측정치로 계산한 북쪽 방향 및 동쪽 방향 치의 RMS 오차를 1σ로 설계하였다.

북쪽 방향 및 동쪽 방향 속도 측정치 잡음의 경우 수식 (3-5)와 같이 DOP에 도플러 측정치 잡음을 곱하여 설계하였다.

$$\sigma_{V_N} = NDOP \times \sigma_{DP}$$
$$\sigma_{V_E} = EDOP \times \sigma_{DP} \quad (3\text{-}5)$$

도플러 측정치 잡음 또한 Mi8의 실측 데이터를 이용해 계산하였다. 그 결과 5.82cm/s가 나왔다.

헤딩 측정치 잡음의 경우 수식 (3-6)과 계산된 속도 측정치 잡음을 이용해 계산한다 [24]. 여기서 V_{Robot}은 바퀴형 이동로봇의 전진속도를 의미한다.

$$\sigma_{\psi} = \frac{\sigma_V}{|V_{Robot}|} \quad (3\text{-}6)$$

INS 측정치의 경우 true state에 설계한 잡음을 더하여 생성하였다. 잡음 생성 방법의 경우 3.1.2항에서 서술한 이유 때문에 가속도 측정치 잡음과 자이로 측정치 잡음을 속력의 함수로 모델링 하였다 [15].

위의 방법으로 생성한 GPS와 INS 측정치 잡음 크기는 Figure 3-5와 같다.

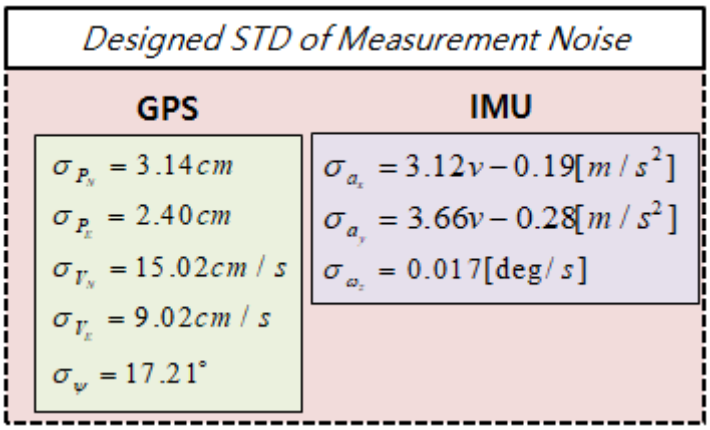

Figure 3-5. 생성된 시뮬레이션 측정치 (GPS 및 INS) 잡음 크기

3.3.2 실험 환경

실험 환경은 Figure 3-6과 같다. 측정치의 경우 GPS는 1Hz주기로 업데이트하였고 INS의 경우 100Hz주기로 업데이트하였다. 바퀴형 이동 로봇 전진 속도는 50cm/s로 고정하였다. 또한 사이클 슬립이 발생에 의한 항법 성능 저하를 분석하기 위해 특정 시각에 2 사이클 슬립을 삽입하였다.

Vehicle Velocity	50cm/s	
Sensor	GPS (1Hz)	
	INS (100Hz)	
Cycle Slip	Insert Time	5sec, 6sec, 11sec, 12sec
	Magnitude	2 cycle slip

Figure 3-6. EKF 시뮬레이션 실험 환경

주행 시나리오는 Figure 3-7과 같이 비선형 궤적을 따라 한 바퀴 주행한다.

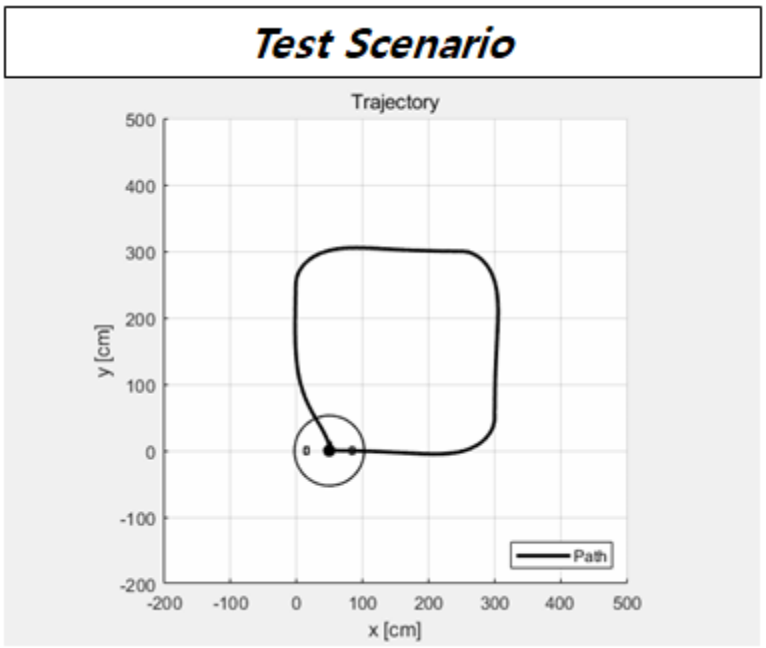

Figure 3-7. 시뮬레이션 주행 궤적

3.3.3 실험 결과

실험 결과는 Figure 3-8과 같다. 좌측 그림에서는 실제 로봇의 위치와 추정 위치를 같이 표현하였고 우측 그림에서는 시간에 따른 동쪽과 북쪽 추정 위치 오차를 표현하였다. 여기서 검정색 선은 실제 위치를, 파란색 선은 추정 위치를, 빨간색 선은 사이클 슬립 삽입 후 추정 위치를 의미하며 화살표와 별표는 사이클 슬립을 삽입한 시각과 위치를 각각 나타낸다.

사이클 슬립 삽입하기 전에는 2D 위치 오차가 9.68cm로 cm급 항법 성능이 나

왔지만 사이클 슬립을 삽입한 후에는 2D 위치 오차가 83.3cm로 항법 성능이 저하되는 것을 확인할 수 있다.

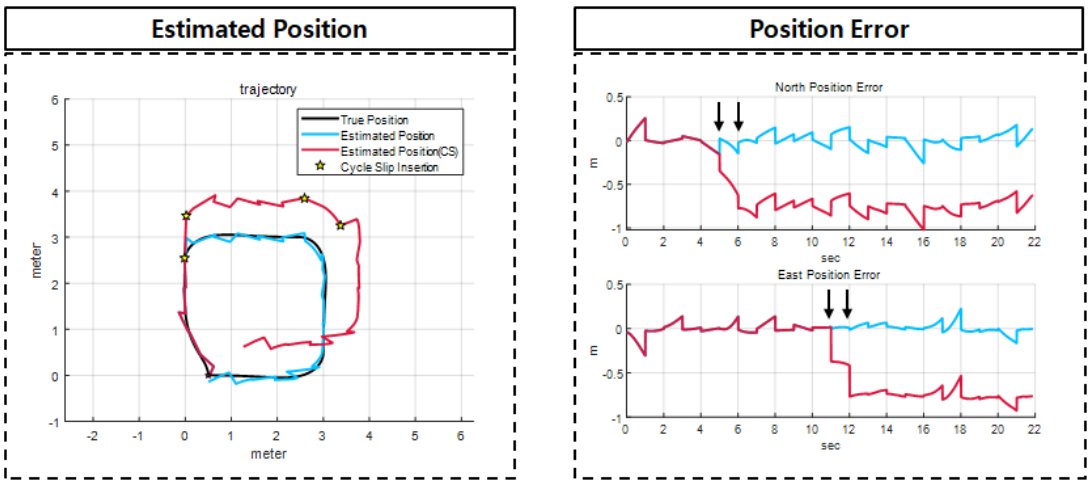

Figure 3-8. EKF 시뮬레이션 실험 결과

4장. 실측 주행 실험

4.1 실험 환경

본 절에서는 바퀴형 이동 로봇에 스마트폰을 탑재하여 주행 실험한 결과에 대해 다루고자 한다. 실험 환경은 Figure 4-1과 같다. 바퀴형 이동 로봇과 센서 탑재 모습은 Figure 4-2와 같다. 이때 기준 수신기와 안테나는 실제 로봇의 위치를 측정하기 위해 탑재하였고 TBC (Trimble Business Center) 프로그램을 사용하여 실제 위치를 계산하였다.

Date	2020. 09. 05. 11:06 ~ 11:23	
Place	Building 312 rooftop, SNU	
Testbed	KOBUKI Wheeled Mobile Robot	
Reference Station	**Receiver**	Trimble® NetR9®
	Antenna	Trimble® Zephryr™ Geodetic 2 RoHS
User	**Ref. Receiver**	Trimble® NetR9®
	Ref. Antenna	Tallysman® VP6000™
	Smartphone	**Xiaomi Mi8**

Figure 4-1. 실측 주행 실험 환경

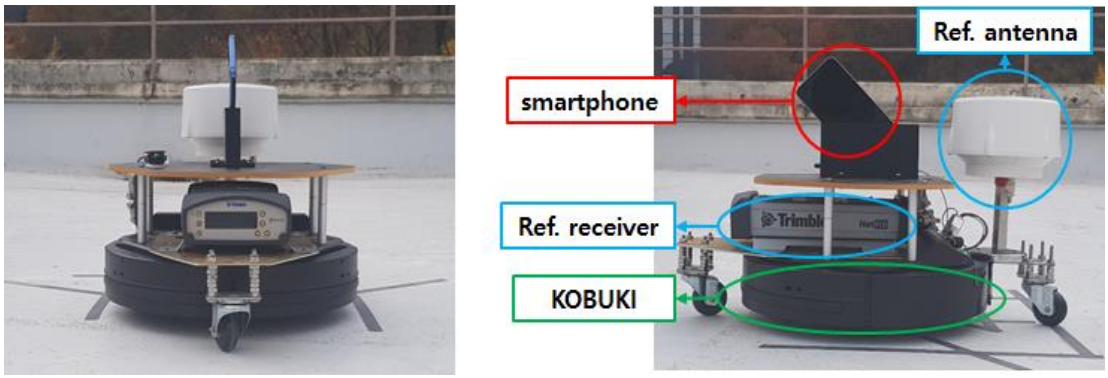

Figure 4-2. 바퀴형 이동 로봇에 수신기와 안테나를 탑재한 모습

4.2 실험 결과

실험 결과는 Figure 4-3과 동일하다. 여기서 검정색 선은 실제 위치를, 빨간색 선은 사이클 슬립 보상 알고리즘 적용하기 전의 스마트폰 추정 위치를, 파란색 선은 사이클 슬립 보상 알고리즘 적용한 후의 스마트폰 추정 위치를 의미한다.

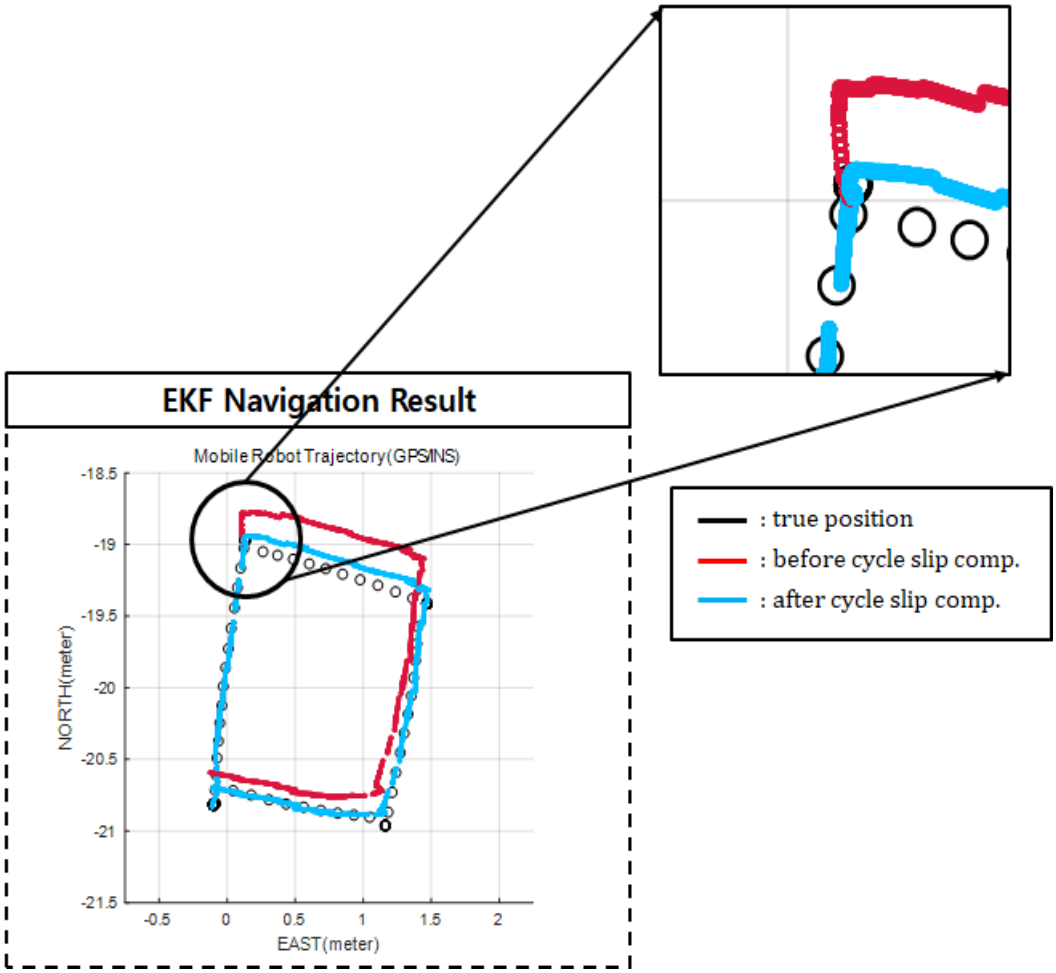

Figure 4-3. 실측 주행 실험 항법 결과

결과를 살펴보면 직진할 때는 문제 없이 정밀한 항법을 수행하다가 첫 번째

회전할 때 위치가 흐르는 것을 확인할 수 있다. 이때 사이클 슬립이 발생했는지 그 여부를 확인하기 위해 2장에서 설계한 모니터링 값을 Figure 4-4에 표현하였다. 여기서 빨간색 선은 사이클 슬립 보상 알고리즘을 적용하기 전의 모니터링 값을, 파란색 선은 사이클 슬립 보상 알고리즘을 적용한 이후의 모니터링 값을, 검정색 점선은 Threshold를, 분홍색 구간은 바퀴형 이동 로봇이 회전할 때의 시간을 의미한다.

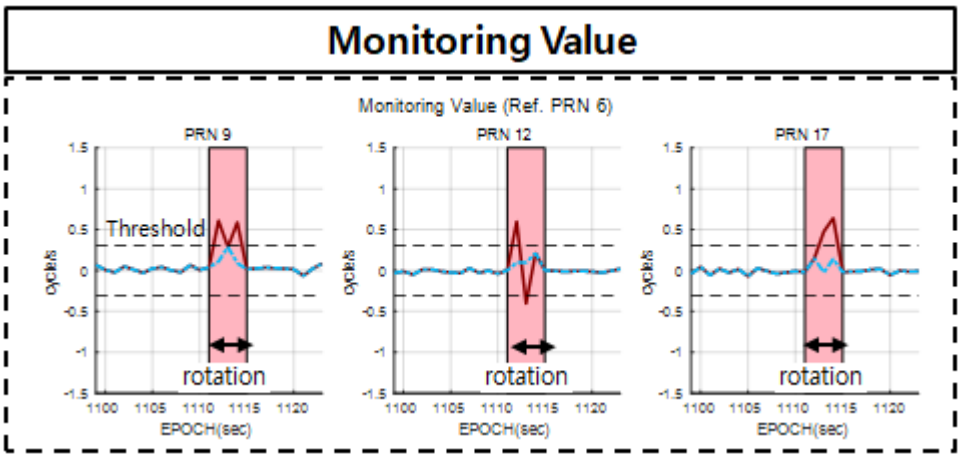

Figure 4-4. 시간에 따른 모니터링 값 추이

위 결과를 통해 2가지 사실을 알 수 있다. 첫 번째, 스마트폰을 회전시켰을 때 사이클 슬립이 발생하였고 그 결과 추정 위치가 실제 위치에서 벗어난 결과를 야기했다. 두 번째, 2.2.4절에서 수행한 사이클 슬립 시뮬레이션의 모니터링 값과 패턴이 매우 유사함을 알 수 있고 이를 통해 Figure 4-4에서 실제로 사이클 슬립이 발생하였음을 증명할 수 있다.

위치 오차를 분석한 결과는 Figure 4-5에 표현하였다. 사이클 슬립 보상 알고리즘을 적용하기 전 직진할 때는 위치 오차가 cm급으로 정밀하지만 회전할 때 위치 오차가 급증한 것을 확인할 수 있다. 사이클 슬립 보상 알고리즘을 적용한 이후에는 위치 오차가 cm급으로 줄어든 것을 확인할 수 있다. 전 구간 2D 위치 오차를 살펴보면 사이클 슬립을 보상하기 전에는 25.9cm이지만 보상한 이후에는 10.3cm로 항법 성능이 60.2% 개선되었다.

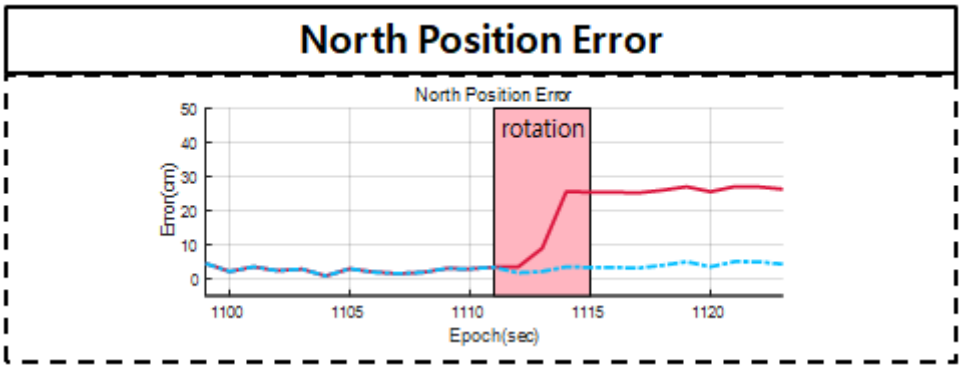

Figure 4-5. 사이클 슬립 발생 전과 후의 북쪽 위치 오차

5장. 결론 및 향후 계획

본 논문에서는 스마트폰의 GPS와 INS를 사용해 바퀴형 이동 로봇의 정밀 항법을 구현하였다. 스마트폰 GPS의 경우 고가 GPS 안테나와 다르게 Linearly Polarization 방법으로 신호를 수신 받고 이중 주파수 신호 활용에 불리하다. 또한 동적 환경에서 사이클 슬립이 빈번하게 발생한다는 선행연구 결과가 존재한다.

이러한 특성을 지닌 스마트폰 GPS로 정밀항법을 구현하기 위해 본 논문에서 단일 주파수 GPS 기반 사이클 슬립 보상 알고리즘을 새롭게 제안하였다. Short baseline환경에서 모니터링 값을 산출하고 사이클 슬립 발생 여부를 감시한다. 제안한 사이클 슬립 보상 알고리즘의 검출 및 보상 성능을 확인하기 위해 하프 사이클 슬립이 삽입된 반송파 위상 측정치를 생성하여 시뮬레이션을 수행하였다. 그 결과 사이클 슬립 검출과 보상이 잘 되었음을 확인하였고 사이클 슬립이 발생하였을 때 모니터링 값의 변화 추이를 확인할 수 있었다.

연속적인 항법 수행을 위해 Loosely Coupled EKF를 구축하였고 이의 항법 성능을 검증하기 위해 시뮬레이션을 수행하였다. 바퀴형 이동 로봇이 비선형 경로를 따라 한 바퀴 돌았을 때 2D 위치 오차가 9.68cm로 cm급 위치 정확도가 나왔다. 사이클 슬립이 발생하였을 때 위치 오차가 얼마나 저하되는 지 확인하기 위해 첫 번째 회전할 때와 두 번째 회전할 때 2 사이클 슬립을 삽입하였고 그 결과 위치 오차가 83.3cm로 크게 증가한 것을 확인하였다.

시뮬레이션을 통해 확인한 사이클 슬립 보상 알고리즘과 EKF를 실측 실험을 통

해 성능을 확인해보았다. 우선 사이클 슬립 보상 알고리즘을 적용하기 전에는 위치 오차가 25.9cm가 나왔다. 추정 위치를 살펴보면 첫 번째 회전할 때 실제 위치로부터 크게 벗어난 것을 확인하였고 같은 시각 모니터링 값을 살펴보았을 때 역시 threshold를 넘어간 것을 확인하였고 이때 사이클 슬립이 발생하였다는 것을 판단할 수 있다. 제안한 사이클 슬립 보상 알고리즘을 적용한 이후에는 모니터링 값이 threshold 아래로 bound된 것을 확인하였고 위치 오차 또한 10.3cm로 줄어들어 정확도가 60.2% 향상되었다.

본 연구는 스마트폰 GPS가 상용 GPS 수신기나 안테나와는 다르게 동적 환경에서 사이클 슬립이 발생할 수 있음을 시뮬레이션과 주행 실험을 통해 확인하였고 이러한 특성을 감안한 단일주파수 GPS기반 사이클 슬립 보상 알고리즘을 새롭게 제안하였다. 향후에는 스마트폰 안테나와 사이클 슬립 발생간의 상관 관계에 대해 연구를 수행할 계획이다.

참고 문헌

[1] S. Parasuraman, A. T. Sam, S. W. K. Yee, B. L. C. Chuon, L. Y. Ren, “Smartphone usage and incrased risk of mobile phone addiction: A concurrent study”, *International Journal of Pharmaceutical Investigation*, vol. 7, no. 3, pp. 125-131, 2017

[2] S. J. Park, Y. S. Cho, M. I. Ji, and J. Y. Kim, “A Study on the trend of LBS technology and market”, *ETRI*, 2015

[3] Ashraf, I.; Hur, S.; Park, Y. Smartphone Sensor Based Indoor Positioning: Current Status, Opportunities, and Future Challenges. Electronics 2020, 9, 891.

[4] Novatel, “Automotive”, [Online]. Available: https://novatel.com/industries/autonomous-vehicles. [Accessed: 11-Dec-2020].

[5] Gogoi, N.; Minetto, A.; Linty, N.; Dovis, F. A Controlled-Environment Quality Assessment of Android GNSS Raw Measurements. *Electronics* 2019, 8, 5.

[6] O. Yurur, C. H. Liu, X. Liu and W. Moreno, "Adaptive Sampling and Duty Cycling for Smartphone Accelerometer," *2013 IEEE 10th International Conference on Mobile Ad-Hoc and Sensor Systems*, Hangzhou, 2013, pp. 511-518, doi: 10.1109/MASS.2013.64.

[7] Paziewski, J., Sieradzki, R. & Baryla, R. Signal characterization and assessment of code GNSS positioning with low-power consumption smartphones. *GPS Solut* 23, 98 (2019). https://doi.org/10.1007/s10291-019-0892-5

[8] Li, G., Geng, J. Characteristics of raw multi-GNSS measurement error from Google Android smart devices. *GPS Solut* 23, 90 (2019). https://doi.org/10.1007/s10291-019-0885-4

[9] Fortunato, M.; Ravanelli, M.; Mazzoni, A. Real-Time Geophysical Applications with Android GNSS Raw Measurements. *Remote Sens.* 2019, 11, 2113.

[10] Zhang, X., Tao, X., Zhu, F. et al. Quality assessment of GNSS observations from an Android N smartphone and positioning performance analysis using time-differenced filtering approach. *GPS Solut* 22, 70, 2018. https://doi.org/10.1007 /s10291-018-0736-8

[11] Robustelli, U.; Baiocchi, V.; Pugliano, G. Assessment of Dual Frequency GNSS Observations from a Xiaomi Mi 8 Android Smartphone and Positioning Performance Analysis. *Electronics* 2019, *8*, 91.

[12] Dabove, P.; Di Pietra, V.; Piras, M. GNSS Positioning Using Mobile Devices with the Android Operating System. *ISPRS Int. J. Geo-Inf.* 2020, *9*, 220.

[13] Chen, B.; Gao, C.; Liu, Y.; Sun, P. Real-time Precise Point Positioning with a Xiaomi MI 8 Android Smartphone. *Sensors* 2019, 19, 2835.

[14] Guo, L.; Wang, F.; Sang, J.; Lin, X.; Gong, X.; Zhang, W. Characteristics Analysis of Raw Multi-GNSS Measurement from Xiaomi Mi 8 and Positioning Performance Improvement with L5/E5 Frequency in an Urban Environment. *Remote Sens.* 2020, *12*, 744.

[15] D. Hong, "Smartphone Based Cycle Slip Detection for Wheeled Mobile Robot Navigation", Seoul National University, 2020.

[16] ICLEBO Kobuki, "KOBUKI & TURTLEBOT2", [Online]. Available: http://kobukikr.yujinrobot.com/. [Accessed: 11-Dec-2020].

[17] Wei, H.; Li, J.; Zhang, S.; Xu, X. Cycle Slip Detection and Repair for Dual-Frequency LEO Satellite GPS Carrier Phase Observations with Orbit Dynamic Model Information. Remote Sens. 2019, 11, 1273.

[18] Gao, Y.; Li Z.; Cycle Slip Detection and Ambiguity Resolution Algorithms for Dual-Frequency GPS Data Processing, *Marine Geodesy*, vol. 22, no. 3, pp.

169-181, 1999.

[19] Parkinson, B.W. “Global Positioning System: Theory and Applications, Volume 2”, *American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc.*, 1996

[20] Kaplan D. E., Hegarty C. J., “Understanding GPS/GNSS Principles and Applications”, 3rd ed., *Artech House*, 2017

[21] Sea & Space, “What is GPS?”, [Online]. Available: eso.org/public/outreach/ eduoff/seaspace/docs/navigation/navgps/navgps-1.html. [Accessed: 11-Dec-2020].

[22] J. Kim, “A Study on Low-Cost High-Precision Vehicle Navigation System for Deep Urban Multipath Environment Using Time Differenced Carrier Phase Measurement”, Seoul National University, 2020

[23] what-when-how, “Introduction to GPS”, [Online]. Available: http://what-when-how.com/gps/introduction-to-gps/. [Accessed: 11-Dec-2020].

[24] M. Kim, “Pseudolite/Ultra Low-Cost IMU Integrated Robust Indoor Navigation System through Real-time Cycle Slip Detection and Compensation”, Seoul National University, 2017

[25] Advanced Test Equipment Rentals, “EMCO 3101 Conical Log Spiral, 200MHz-1GHz”, Available: https://www.atecorp.com/products/ets-lindgren-emco/3101. [Accessed 20-Jan-2021].

[26] Wikiwand, “Inverted-F antenna”, Available: https://www.wikiwand.com/en/Inverted-F_antenna. [Accessed 11-Dec-2020].

[27] Wikipedia, “Inertial measurement unit”, [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Inertial_measurement_unit. [Accessed: 15-Dec-2020].

[28] Titterton D. H., Weston J. L., “Strapdown Inertial Navigation Technology - 2nd Edition”, *The Institute of Electrical Engeineers*, 2004

[29] M. Kang, “A Study on Improvement of Navigation Performance of Land Vehicle using Low Cost 2D DGPS/INS/Magnetometer Considering Gravity”,

Seoul National University, 2017

[30] Wikipedia, “Korean Air Lines Flight 007”, [Online]. Available: https://en.wiki pedia.org/wiki/Korean_Air_Lines_Flight_007. [Accessed: 15-Dec-2020].

[31] Hide, C., & Moore, T. “GPS and low cost INS integration for positioning in the urban environment”, *In Proceedings of the 18th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation, ION GNSS 2005* (Vol. 2005, pp. 1007-1015).

Abstract

A Study on Precise Navigation of Smartphone based Wheeled Mobile Robot with GPS Cycle Slip Compensation

Jongju Kim
School of Aerospace Engineering
The Graduate School
Seoul National University

With the recent increase in the number of smartphone users, the use of GPS embedded in smartphone is naturally increasing. Industries are also establishing location-based services that utilize smartphone GPS and selling them to markets. However, precise navigation performance is required to provide location-based services to consumers, and prior studies show that navigation performance is still not accurate.

To find out why navigation performance was reduced, we first compared and analyzed high-end GPS antennas with smartphone GPS antennas. According to the analysis, the position of the L1 and L5 frequency antennas is different from that of the high-end GPS antennas. Therefore, the environment is very poor to receive dual-frequency signals. Also, smartphone GPS antennas are not suitable for receiving GPS signals broadcast in the Right Handed Circular Polarization

(RHCP) manner because they receive signals in the Linearly Polarization manner.

Furthermore, a prior study of smartphone GPS navigation shows that cycle slip occurs frequently in dynamic environments. Cycle slip is a phenomenon in which a carrier phase measurement is subjected to an unspecified multiple number of jumps by a signal disturbance receiving element, which continuously deteriorates the position accuracy. Therefore, cycle slip compensation is essential to perform cm-class precision navigation.

Combining these smartphone GPS antenna characteristics and prior research results, this work proposes a cycle slip compensation algorithm using only single-frequency GPS signals. Simulations have been conducted to verify the performance of the proposed algorithm and we confirm that the cycle slip is well compensated.

GPS signals are received at 1 Hz intervals, making it difficult to perform continuous navigation with only GPS. In this work, we therefore perform navigation by combining INSs, which are quick to cycle and embedded in smartphone, using Extended Kalman Filter (EKF). Simulations are conducted to verify the performance of the EKF coupled navigation that we have built. We confirm that the cm-class navigation performance is achieved in scenarios that move along nonlinear trajectories.

Finally, the proposed algorithm and the EKF combined navigation system were used to conduct driving experiments on smartphone. As a result, we found that the navigation performance improved by about 60% when applied with the proposed cycle slip compensation algorithm, although the position accuracy is poor due to the cycle slip occur when the smartphone is rotated.

Keywords : Smartphone GPS, Smartphone INS, Antenna, GPS/INS Integration, EKF, Cycle Slip

Student Number : 2019-23718