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

공학석사 학위논문

보행자로 구성된 소규모 이동 애드혹 네트워크의 GPS 제한 시나리오에서의 실외 측위 전략

2023년 2월

서울대학교 대학원

전기 · 정보공학부

최 자 명

보행자로 구성된 소규모 이동 애드혹 네트워크의 GPS 제한 시나리오에서의 실외 측위 전략

지도교수 김 성 철

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함
2022년 11월

서울대학교 대학원
전기 · 정보공학부
최 자 명

최자명의 석사 학위논문을 인준함
2022년 11월

위 원 장 심 병 효 (인)

부위원장 김 성 철 (인)

위 원 최 완 (인)

초 록

위성통신은 실외에서의 위치추정에서 큰 의존도를 차지하며, 특히 군사/안보 분야에서는 그 의존도가 갈수록 증가하고 있다. 하지만 위성통신 교란이나 지형/건물에 의한 쉐도잉으로 측위에 활용이 불가하게 될 경우를 대비하여, 기본적으로 위성통신 정보를 사용하더라도 제한시 대체할 수 있는 실외 측위 전략이 요구된다. 본 논문에서는 소규모의 보행자로 이뤄진 모바일 애드혹 네트워크(MANET)에서 사용할 수 있는 GPS 제한 상황에서의 실외 측위 전략을 연구하고자 하였다. 측위 기반기술로 RSS(Received Signal Strength) 기반 거리측정 기법과 PDR(Pedestrian Dead Reckoning) 기법을 채택하였으며, 인프라가 없는 현실적인 3가지 실외 환경에서 시작지점(IP)과 확인지점(CP)의 좌표 정보만으로도 적용할 수 있는 단순한 모바일 단일 앵커(Mobile single anchor) 측위 기법을 제시하였다. 통합된 측위 전략은 RSS 기반 거리측정과 PDR의 장점을 융합하여 목표 분야의 실외 이동 모바일 애드혹 네트워크 시나리오에서 요구되는 정확도/에너지/시간 기준을 달성하였고 그 효율성 또한 입증되었다. 이를 통해 군사/안보 등의 실외 측위 분야에 다양한 적용이 가능할 것으로 예상된다.

주요어 : 측위(Localization), RSS(Received Signal Strength), PDR(Pedestrian Dead Reckoning), MANET(Mobile Ad-hoc Network), 단일 앵커 측위(Single Anchor Localization), 최소제곱법(Least Square), 다차원척도법(Multi-dimensional Scaling, MDS)

학 번 : 2021-26610

목 차

초 록 ····· i

목 차 ····· ii

그림 목차 ····· iv

표 목차 ····· v

제 1 장 서론 ····· 1

제 2 장 배경이론 ····· 4

제 1 절 System Model ····· 4

제 2 절 Pedestrian Dead Reckoning(PDR) ····· 7

제 3 절 RSS-based Localization ····· 11

1) RSS 기반 거리 추정(RSS based ranging) ····· 11

2) 최소제곱법(Least Square, LS) ····· 13

3) 다차원척도법(Multi-dimensional Scaling, MDS) ····· 14

제 3 장 제안 실외 측위 전략 ····· 19

제 1 절 RSS와 PDR의 결합 ····· 20

제 2 절 RSS 거리추정 정확도 향상 ····· 21

제 3 절 모바일 단일 앵커 측위 ····· 23

제 4 장 시뮬레이션 결과 ····· 26

제 5 장 결론 ····· 32

참고문헌 ····· 33

Abstract ····· 35

그 림 목 차

[그림 2.1] Mobile ad-hoc network(MANET) ····· 4
[그림 2.2] N = 10인 MANET의 IP(왼쪽), 3개의 CP를 거쳐 좌하단에서 우상단으로 이동하는 실제 동선(오른쪽) ····· 6
[그림 2.3] MANET의 1,000초의 이동시간 동안 노드간 최대거리(왼쪽), 노드간 접점도(오른쪽) ····· 6
[그림 2.4] 최초 위치(t = 1)에서 추정한 스텝, 방향을 기반으로 위치를 추정하는 PDR의 원리 ····· 7
[그림 2.5] 가속계 데이터를 활용한 스텝 감지 ····· 8
[그림 2.6] 시간에 따라 증가하는 PDR 누적 오차 ····· 10
[그림 2.7] 3가지 실외 환경(Grass, Sparse tree, Dense tree) ··· 12
[그림 2.8] 최소제곱법의 원리(2-D 공간에서 앵커 수가 3일 경우) 13
[그림 2.9] 국가간 직선거리 정보(km)를 토대로 제작된 거리 행렬(위)을 기반으로 MDS를 통해 2D 상에 상대적 위치를 나타낸 그래프(아래) ····· 17
[그림 2.10] 1차 MDS가 종료된 앵커(적색)와 노드(청색)들의 추정위치(흑 - 앵커, 녹 - 노드)(왼쪽), 회전을 적용한 결과(오른쪽) ····· 18
[그림 2.11] Translation 벡터를 통한 Translation 문제 해결 ···· 18
[그림 3.1] 3가지 지형(Grass, Sparse tree, Dense tree)별 패킷 수(n)에 따른 위치추정 오류 ····· 22
[그림 3.2] 모바일 단일 앵커 측위 개념도 ····· 23
[그림 3.3] 최초 앵커배치와 최초 측위(왼쪽), 스티칭(오른쪽) ··· 24
[그림 3.4] 앵커 정보가 2개(왼쪽), 1개(오른쪽)인 측위 불가 노드의 추가 VA 생성 요청영역 ····· 25
[그림 4.1] 거리기반 측위, 앵커 배치방법(스티칭 여부)별 측위 정확도(RMSE) (왼쪽 - 축 제한 없음, 오른쪽 - y축 최대 20 제한) 27
[그림 4.2] Dense tree 환경에서 3가지 기법(PDR만 사용, 스티칭 적용한 제안 전략, 스티칭 적용하지 않은 제안 전략)를 사용했을 경우의 MANET의 이동시간 경과별 누적 측위 오차 ····· 30

표 목 차

[표 2-1] 환경별 경험적 경로손실 방정식 파라미터 ····· 12
[표 3-1] 환경별 거리추정 오차가 수렴하는 시점의 n ····· 22
[표 4-1] 시뮬레이션 파라미터 ····· 26
[표 4-2] 스티칭 여부에 따른 측위 소모시간, MA의 이동거리, 총 배치된 앵커의 수 ····· 28
[표 4-3] RSS 기반 에너지 소모량 계산을 위해 사용된 파라미터 29
[표 4-4] 앵커 배치방법별 정확도/에너지소모/시간소모 비교 ···· 31
[표 4-5] 군사/보안 분야 애플리케이션별 정확도/에너지/소모시간 요구 31

제 1 장 서론

사람과 물체의 위치정보는 오늘날 수많은 위치기반 서비스(LBS, Location Based Service)에서 중요하다. 사용자의 자기위치를 알려주고 추적하는 셀프 네비게이션(Self-navigation), 병원에서 이뤄지는 환자들의 위치추적, 물류창고 내 제품의 위치 확인 등 그 애플리케이션 또한 갈수록 확장되고 있다. 위치정보의 제공은 정보가 요구되는 타겟에 대한 정확한 측위(Localization)가 이루어져야 가능하다. 다양한 무선 측위 기법들이 제안되고 연구되어온 가운데, 실내와 다르게 실외에서의 측위 기법은 GPS(Global Positioning System)와 같은 위성통신에 크게 의존하는 경향이 있다. 일정 수준 이상의 정확도를 보장하는 GPS는 많은 사용자들에게 위치기반 서비스를 제공하고 있으며, 정지궤도 위성에서 저궤도 위성으로 발전 중인 위성통신 시스템의 발전으로 인해 그 의존도와 정확도가 갈수록 증가할 전망이다. 특히 군사(Military), 보안(Security) 분야에서는 실외 측위에서의 GPS 의존도가 특히 높다. 전장가시화(Battlefield visualization)가 핵심인 군사 분야, 특정 영역의 안전을 확보하기 위한 정찰/수색/감시가 중요한 보안 분야에서는 인프라가 부족하고 전파를 이용한 측위를 하기에 이상적이지 않은 환경에서의 위치정보를 요구하는 경우가 대부분이기 때문이다.

GPS 기반 측위의 정확도는 서브미터 단위까지 확장되고 발전하며 제시한 분야에서 그 의존도를 갈수록 높이고 있다. 하지만 GPS를 사용할 수 없는 상황들이 발생한다. 첫 번째는 여러 현대 전쟁과 지역 분쟁의 사례에서 볼 수 있는 GPS 교란이 사용되는 경우[1]이고, 두 번째는 지형과 건물 등에 의한 GPS 쉐도잉(Shadowing)의 경우이다. 이렇게 GPS를 더 이상 활용할 수 없는 경우가 발생하면 다른 실외 측위 방법을 사용해야 한다. 나침반 등을 이용한 방향 탐지는 가능하겠지만, 시간에 따라 역동적인 상황 변화를 보이는 군사/보안 분야에서는 현장 요원의 위치 확인을 통해 판단/결심 여건 보장이 중요하기 때문이다. 실외 측위에서 GPS 외에 글로벌 위치정보를 제공하기 위한 연구사례로는 드론(Drone)과 같은 공중 앵커(Aerial anchor)를 활용하거나[2], 산 속에 사전에 배치

해둔 소형 무선 센서들을 활용하여 산불시 경보 및 소방대원의 측위에 활용하는 연구가 제시되었다[3]. 하지만 본 논문에서는 목표로 한 시나리오를 아래와 같이 정의하여 이에 맞는 새로운 측위 전략을 연구하려 하였다. 목표 시나리오의 특징은 아래와 같다.

1. **군사/보안 시나리오(Military / security scenario)**
   실외에서 이뤄지는 공격/정찰 등의 군사작전 상황(방어작전은 아군 측 인프라 사용이 가능하기 때문에 제외하였음), 범죄자/실종자 수색 등의 보안 상황
2. **인프라가 없음(No infrastructure)**
   WiFi, 사전 설치된 센서 등의 인프라를 활용할 수 없는 환경
3. **보행자로 구성된 네트워크(Network of pedestrians)**
   군사/보안 시나리오에서 근간이 되는 사람, 즉 보행자들이 노드(Node)와 앵커(Anchor) 역할을 수행하는 네트워크
4. **현실적인 실외 환경(Practical outdoor environment)**
   자유공간(Free space)와 같이 전파 특성이 이상적이지 않은, 나무와 돌, 수풀과 같은 자연 장애물이 있는 환경

위와 같은 목표 시나리오의 특징에 의거하여 본 논문에서 연구할 측위 전략의 성능 분석을 위한 3가지 조건들을 아래와 같이 설정하였다. 조건들은 목표로 했던 군사/보안 상황 외에도 유사한 일반적인 애플리케이션에 대한 적용을 고려할 수 있도록 설정되었다.

1. **측위 정확도(Localization accuracy)**
   GPS 기반 측위와 동일한 1 ~ 5m 수준의 측위 오차 수준
2. **에너지 소모(Energy consumption)**
   측위 장기화를 염두, 정확도 기준 내에서의 에너지 소모 최적화
3. **측위 완료까지 소모되는 시간(Time spent for localization)**
   시나리오에 지장이 없도록 신속한 계산 속도를 보이는 측위 전략

GPS 사용이 제한된 non-GPS 측위 기법으로는 대표적으로 무선 센서 네트워크(WSN, Wireless Sensor Network) 내의 센서들을 이용한 협력

측위나 데드 레코닝(Dead Reckoning)과 같은 자체 내비게이션 기술을 고려할 수 있다. WSN 측위는 여러 센서 노드를 확보하고 노드 간의 연결 또는 거리정보 등을 활용하여 거리 기반 측위(Range based localization)을 통해 센서의 위치를 추정할 수 있다. 그러나 거리 기반 측위는 환경에 의해 야기된 거리 추정 오차의 영향을 크게 받으며, 때때로 큰 측위 오차를 수반한다. 데드 레코닝은 착용 가능한 여러 센서를 활용해, 사용자 스스로의 움직임에 기반한 정보를 통해 사용자의 위치를 추적하는 측위 기법으로 어떠한 인프라에도 의존하지 않는다는 장점이 있다. 하지만 이동하는 시간/거리가 늘어남에 따라 누적되는 측위 오류가 증가되기 때문에, 오류가 너무 커지지 않게 일정 주기/지점마다 글로벌 좌표에 가깝게 좌표를 보정해야한다는 단점이 있다. 본 논문에서는 거리추정을 위한 채널 데이터가 확보된, 잔디와 나무, 바위등이 고려된 3가지의 현실적인 실외 환경에서 두 측위 기법, 거리 기반 WSN 측위와 데드 레코닝을 시나리오의 특징에 맞게 결합하여 각자의 장점을 취하며 서로 보완하는 측위 전략을 연구하였다.

본 논문에서 제안한 측위 전략은 네트워크의 상태에 따라 두 종류로 구성된다. 첫 번째, 개인 측위단계에서 각 개인(노드)은 GPS 정보를 기반으로 파악되어있는 시작지점(IP, Initial Point)에서 출발하여 확인지점(CP, Checkpoint, 사전에 절대좌표를 파악해두어 다음 이동 목표지점으로 삼거나 이동간 측위에 활용할 수 있음)에 도달하기까지 WSN의 자체 이동성 특징에 기반해 이동하며 데드 레코닝으로 측위한다. 두 번째, WSN 측위단계에서는 WSN이 확인지점에 도달하면 해당 확인지점의 절대좌표를 자신의 좌표로 취하는 하나의 앵커를 이용한 단일 앵커 측위(Single anchor localization)을 실시하고, 모든 노드의 측위가 완료되면 다음 확인지점으로 이동한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서 배경이론으로 네트워크 모델인 MANET과 그에 적용이 가능한 데드 레코닝, 거리 기반 측위 방식에 대해 소개한다. 3장에서는 시나리오에서 요구되는 정확도와 에너지 효율, 수렴 속도를 고려한 실외 측위 전략이 제안되며, 4장에서 제안된 측위 전략을 시뮬레이션을 통해 검증하고 5장에서 결론을 맺는다.

제 2 장 배경이론

제 1 절 System Model

본 논문에서 시스템 모델로 구성한 네트워크 모델은 모바일 애드혹 네트워크(MANET, Mobile Ad-hoc Network)로, 인프라의 도움 없이 외부 기간망의 도움 없이 멀티홉(Multi-hop) 방식으로 서로 데이터 포워딩을 하며 자체 통신하며 이동하는 네트워크이다. 애드혹 네트워크 특성에 따라 MANET은 다음과 같은 네트워크 특징을 갖는다.

1. **통신 가능범위**(R) : 각 노드는 동일한 전송범위, 즉 신호를 주고받을 수 있는 통신 가능범위를 가지고 있다.
2. **역할의 다양성** : 각 노드는 메시지를 보내거나 받을 수 있으며 라우터 역할도 수행이 가능하다.
3. **유연한 네트워크 구성** : 각 노드는 서로 통신 가능범위 내에 있을 때 각각의 임시 네트워크를 구성한다.

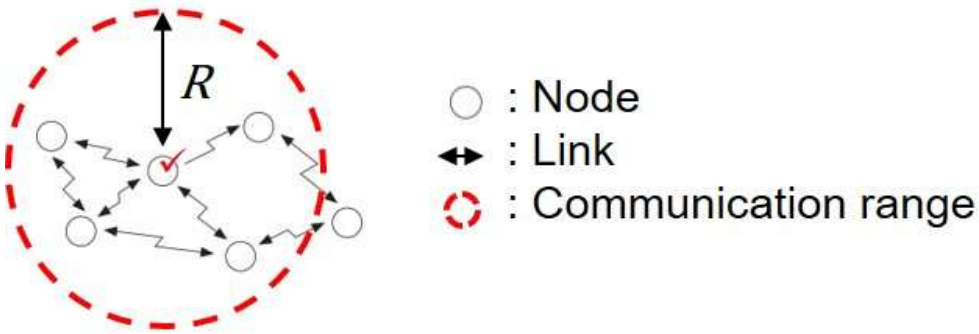

그림 2.1 Mobile ad-hoc network(MANET)

거리 기반 측위와 데드 레코닝 측위를 위해 모든 노드는 무선 통신장비 외에도 거리측정장치와 관성측정장치(IMU, Inertial Measurement Unit), 그리고 프로세싱 장치를 지니고 있다고 가정한다.

목표로 한 군사/보안 시나리오의 특성에 따라 시스템 모델의 MANET은 아래와 같은 이동성(Mobility) 특징을 가진다.

1. **노드간 최소거리** : 임무수행의 효율과 안전을 위해 노드가 서로 가까이 붙어 다니지 않도록 노드간 일정 최소거리를 유지
2. **그룹 이탈 방지 메커니즘** : 통신 가능범위 내 노드의 수가 특정 수 이하가 되면 시야, 무선통신 등의 물리적인 수단을 통해 다시 통신 가능범위 내 노드의 수가 늘어나는 방향과 속도로 이동함으로써 그룹을 이탈하는 노드가 최소화되도록 유지하는 메커니즘
3. **지휘자**(Commander) : 전체적인 MANET을 다음 CP로 이동하도록 이끄는 역할 수행

MANET의 사이즈 N은 군사/보안 분야의 가장 일반적인 사이즈인 10명 내외의 보행자로 구성된 분대급(Squad) 사이즈를 목표로 하였다. 분대급 소형 네트워크를 상정한 이유는, 수많은 군사/보안 상황에서 임무수행간 더 낮은 단위로 분리되지 않는 그룹 단위임과 동시에 하나의 지휘자가 최대로 직접 지휘할 수 있는 구성원의 최대 수이기 때문이다. 즉 네트워크가 계속 이동을 하는 와중에도 네트워크 구성원이 서로 일정 범위 이상 떨어지지 않아 WSN 내 협력 측위(Cooperative localization)를 적용할 수 있으며 추후 더 큰 네크워크로 측위를 확장할 수 있는 최소 규모의 네트워크이다. 따라서 본 논문에서 적용할 MANET의 사이즈 N은 지휘자를 포함해 총 N = 10개의 노드로 정의하였다.

인프라가 없는 조건 속에서 활용할 수 있는 최소한의 글로벌 참고정보인 시작지점(IP)과 확인지점(CP)의 정보는 각각 마지막으로 수신된 GPS 정보와 사전 파악된 절대좌표로 설정되어, 모두 글로벌 참고점으로 활용할 수 있다. MANET은 GPS를 사용하며 이동하는 도중 GPS 제한이 발생한 시점을 시작지점으로 하여 알고리즘을 시작하고, 지휘자의 다음 확인지점을 향한 이동 지휘를 따라 지휘자를 중심으로 통신 가능범위 R에 기반한 멀티홉 통신 가능상태를 유지하며 자율적으로 이동한다. 이 때 군사/보안 임무수행의 효율을 위해 노드간 가까이 붙어 다니지 않도록 노드간 일정 최소거리를 유지하며, 이동속도는 보폭의 크기에 따라 저속(약 0.3m), 일반(약 0.7m). 고속(약 0.85m)으로 정의하고 랜덤하게 변동한다. 실제 이동의 예시는 그림 2.2과 같다.

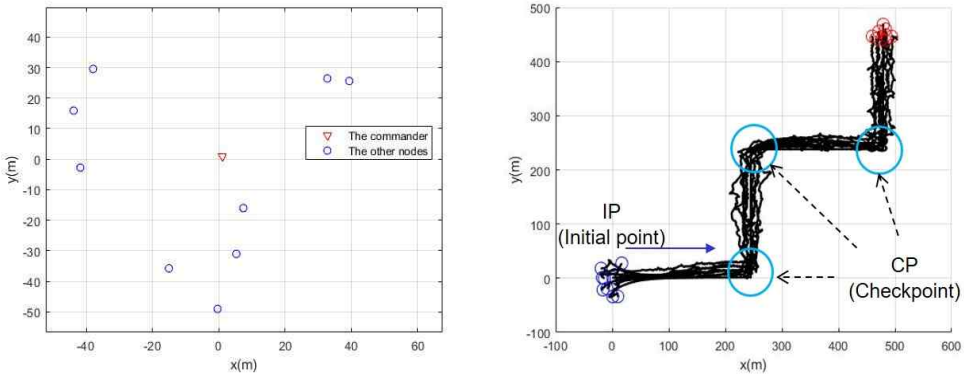

그림 2.2 N = 10인 MANET의 IP(왼쪽), 3개의 CP를 거쳐 좌하단에서 우상단으로 이동하는 동선 예시(오른쪽)

모델링한 MANET의 이동성을 확인하기 위해 동일한 IP, CP 상에서 통신 가능범위 R = 30m, 1초당 1스텝을 밟는 총 시간 1,000초의 시뮬레이션을 10,000번 진행하였다. 시뮬레이션 결과 그림 2.3의 왼쪽 그림에 따르면 GPS의 신뢰도를 믿고 임무수행 범위를 상대적으로 크게 운용 가능하던 시점인 IP에서는 노드간 최대 거리가 컸으나, 지속적으로 이동해도 2-hop 거리인 2*R = 60m을 크게 벗어나지 않는 등 네트워크를 이탈한 노드가 없어 WSN 측위가 가능함을 보였다. 그림 2.3의 오른쪽 그림인 시간 경과에 따른 노드 접점도(Node degree)에 따르면 노드 하나당 통신 가능범위 R 내 노드의 수가 일정 시간 후부터는 거리 기반 측위에 최소 필요한 앵커 수인 3개(2-D),. 4개(3-D)보다 많은 5개 이상이 되므로, 각 CP에서의 멀티홉 통신, 추가 앵커 배치 등 통한 거리 기반 측위가 가능함을 보였다.

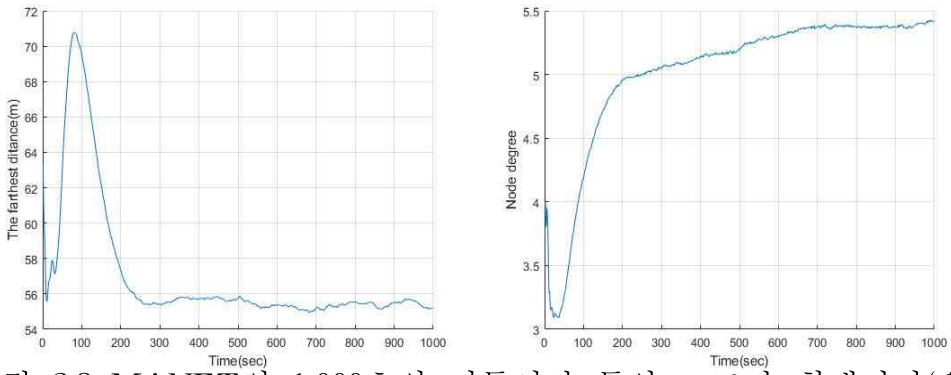

그림 2.3 MANET의 1,000초의 이동시간 동안 노드간 최대거리(왼쪽), 노드간 접점도(오른쪽)

제 2 절 Pedestrian Dead Reckoning (PDR)

데드 레코닝 기법은 일반적으로 가속도계(Accelerometer), 자이로스코프(Gyroscope), 자기계(Magnetometer) 및 기압계(Barometer) 등을 포함하는 관성측정장치(IMU)가 위치추정 타겟 물체/사람에 탑재되어 타겟의 위치, 속도 및 방향을 측정하고 이에 대한 연속적인 위치추정치를 제공하는 측위 기법이다. PDR은 보행자를 타겟으로 하는 대표적인 데드 레코닝 기법이며, 그림 2.4와 같이 감지한 각 스텝 시점마다 스텝과 방향 추정치를 통합하여 사람의 추정 위치와 방향을 계산한다.[4], [5], [6], [7], [8], [9]

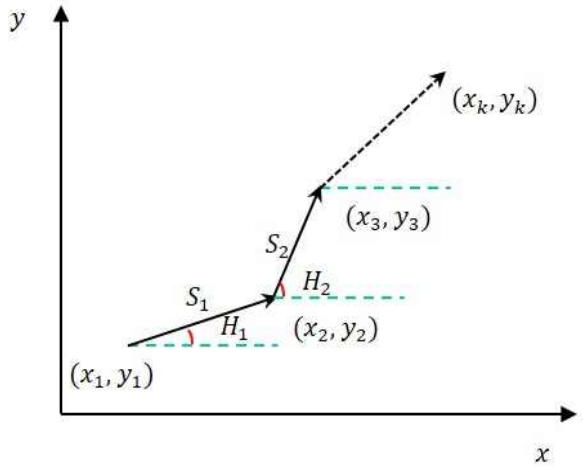

그림 2.4 최초 위치($t = 1$)에서 추정한 스텝, 방향을 기반으로 위치를 추정하는 PDR의 원리

허리, 가슴, 다리, 발 또는 머리 등 여러 IMU 장착 위치를 기반으로 한 연구가 실시되었는데, 발에 장착하는 풋마운트 시나리오가 가장 많이 연구되었으며 평균 에러도 1.38%로 낮은 결정적인 이점을 가지고 있다 [4]. 풋마운트 IMU기반 PDR은 가속도를 통합한 후 드리프트를 줄이는 제로 속도 업데이트(ZUP) 전략을 적용할 수 있으며 스텝 검출이 견고해진다. 따라서 본 논문에서는 발에 장착된 IMU 시나리오를 가정한다.

스텝 추정은 스텝 감지, 스텝 길이 추정의 2가지 단계로 이뤄진다. 일반적으로 가속계 데이터의 피크 검출(Peak detection), 또는 임계값

(Threshold) 판단 등을 통해 그림 2.4와 같이 스텝을 추정하고, ZUP나 Weiberg SL 알고리즘 등을 사용해 스텝 길이를 추정한다[5]. 스텝 길이 추정의 오류는 일반적으로 총 주행 거리의 0.5%에서 10%에 이르지만, 이 수치는 구현된 알고리즘과 사용된 특정 관성 센서의 가속도계 노이즈, 바이어스를 정의하는 기술에 크게 의존한다[6]. [5]에서는 저비용 MEMS 센서로 실내, 축구장, 야외 아스팔트 공터 환경에서 서로 다른 사람들이 일정하지 않은 각자의 속도로 이동한 것을 PDR로 측위한 결과 스텝 감지 에러는 1%, 스텝당 누적 에러는 3.5%였다. 또한 [7]에서는 중저가 IMU를 발에 장착하고 400미터 트랙 돌았을 때 164 스텝에 4.27 미터 에러를 보여, 스텝당 누적 0.25m 에러를 유발함을 보였다.

진행방향 추정은 자이로스코프를 통해 스텝별로 이뤄진다. 고전적인 관성 메커니즘에서 자이로 정확도는 시간에 따라 증가하는 3차 위치 오류를 초래하기 때문에 전체적인 위치 정확도를 제한하게 된다[9]. [6]에서는 직선거리를 200스텝 이동한다고 했을 때 5%의 각도 에러를 보였다.

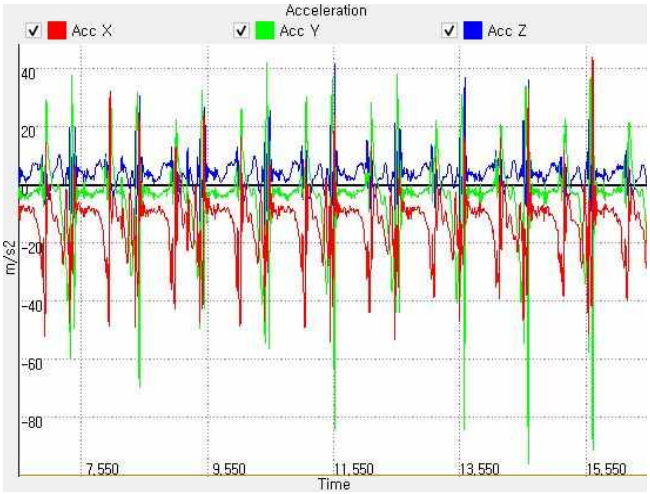

그림 2.5 가속계 데이터를 활용한 스텝 감지

PDR 측위 기법은 인프라에 의존하지 않고 주변 센서의 유무에 의존하지 않기 때문에 군사/보안 분야의 측위에서 특히 매력적이다. 위성통신 정보를 사용할 수 없는 시나리오, 특히 본 논문에서 목표로 한 소규모 MANET과 같이 노드의 밀도가 낮은 WSN 시나리오나 인프라가 없는 환경에서 측위 및 위치추적 수단으로 고려될 수 있다. WSN으로 모

든 순간마다, 예를 들어 초단위로 계속 측위를 하기에는 에너지 효율적이지 않기도 하다. 앞서 설명한 내용을 고려하면 PDR은 WSN에서 정확한 위치를 알고 있는 앵커를 매순간 활용할 수 없는 경우, 그 기간 동안에 비교적 정확한 측위 및 위치추적을 제공할 수 있는 기법으로 고려될 수 있다. 그러나 새 위치가 이전 추정치를 기준으로 계산되므로, 앞서 소개한 스텝 에러와 방향 오차가 시간에 따라 누적되면 시간에 따라 측위 오차가 무한히 증가할 수 있다. 또한 상대적인 항법 시스템이기 때문에 시작 좌표가 글로벌 좌표에 가까워야 하며, 누적 오차를 보정하기 위해 매우 정확한 수준의 보정 측위 과정이 요구된다.

PDR 누적 오차는 가속도계 및 자이로스코프에 내장된 노이즈(Noise)와 바이어스(Bias)에 의해 발생한다. 관성 측정을 통합하여 사용자의 위치를 추적할 때 주요 오류 기여는 다음과 같다 [10]

- 가속도계 노이즈에 의한 오차 : σ_n

  시간 t의 1.5승에 따라 RMSE(Root Mean Square Error) 값이 증가하는 측위 오류를 발생시킨다. 여기서 f_s는 샘플링 주파수이며 σ_d는 가속도계 노이즈의 표준 편차이다.

$$\sigma_n = \frac{1}{2}\frac{\sigma_d}{\sqrt{f_s}}t^{1.5} \tag{2.1}$$

- 가속도계 바이어스에 의한 오차 : σ_{abias}

  이중 적분 시 t의 2승에 따라 증가하는 측위 오차를 생성한다. 여기서 A는 가속도계 바이어스이다.

$$\sigma_{abias} = \frac{1}{2}At^2 \tag{2.2}$$

- 자이로스코프 바이어스에 의한 오차 : σ_{gbias}

  t의 3승에 따라 증가하는 위치 오차를 생성하는데, 여기서 B는 자이로스코프 편향이고 a는 센서에 영향을 미치는 가속도(일반적으로 중력 g에 의한 가속도)이다.

$$\sigma_{gbias} = \frac{1}{6}aBt^3 \tag{2.3}$$

누적된 PDR 오차를 시스템 모델의 MANET에 대한 시뮬레이션으로 확인해보았다. 그림 2.6은 초당 속도로 저속(약 0.3m), 일반(약 0.7m). 고속(약 0.85m) 중 랜덤한 속도를 취하도록 설정한 MANET의 1,000초 동안의 이동간 누적된 노드당 PDR 에러를 RMSE(Root mean square error)로 나타낸 것이다. 시뮬레이션에 사용된 IMU 자체내장 노이즈와 바이어스 데이터는 X-sens社(Enschede, The Netherlands)의 MTi 시리즈의 중저가 라인업의 IMU의 데이터를 적용하였다.

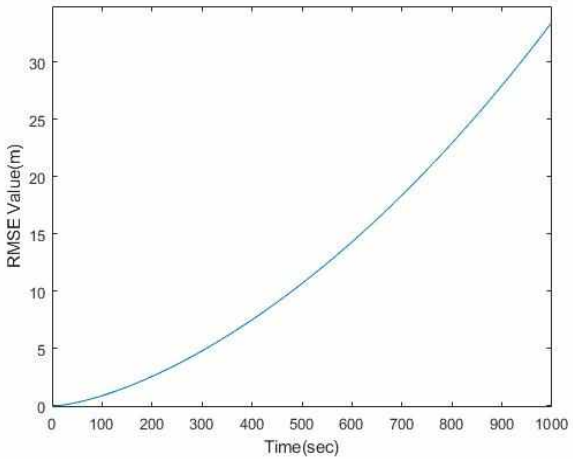

그림 2.6 시간에 따라 증가하는 PDR 누적 오차

위 결과로 확인할 수 있는 것은 우리가 설정한 MANET의 이동 특성에 따르면 약 5분(300초)의 시간이 지나기 전에는 노드당 PDR 누적 오차가 5m 이하로 좋은 정확도를 보이는 반면, 5분 이상 글로벌 좌표로의 업데이트가 없을 시 누적 오차가 크게 증가한다는 것이다. 이를 통해 본 논문에서의 실외 측위 전략에서 고려한 점은 다음과 같다. 첫째, CP를 배치할 시 적어도 5분 거리보다는 먼 곳에 설치하는 것이 효과적이다. CP마다 누적 에러 보정을 실시해야 하기 때문에 간격이 너무 가깝거나 먼 CP를 취하지 않도록 지휘자가 판단해야 한다. 둘째, CP에서의 단일 앵커 측위간 단일 앵커의 이동을 PDR을 이용해 추정하며 가상 앵커를 배치한다고 가정할 때, 가상 앵커 좌표의 정확도는 단일 앵커의 이동 시간이 5분을 넘어가면 5m 이상의 오차를 내포하게 되므로 짧은 시간 내에 가상 앵커의 배치를 마쳐야 한다.

제 3 절 RSS-based Localization

RSS(Received signal strength) 기반 측위는 수신단에서 수신된 신호의 세기를 이용해 송신단과의 거리를 추정한다. 전력소모가 적고 복잡도가 크지 않은 점, 그리고 수신 신호의 세기만을 이용하기 때문에 하드웨어의 구현이 간단하다는 장점이 있어 거리 기반(Range-based) 측위에서 가장 널리 사용되는 방식이다[11]. 이런 저비용(Low cost) 장점은 본 논문에서 목표로 하는 군사/보안 분야에서 확장성(Scalability)이 중요한 요소인 점을 고려할 때 RSS 기반 측위를 기반기술로 고려할 수 있게 한다. 다른 거리기반 측위의 대안으로 흔히 제시되는 Time of Arrival(ToA) 방식은 신호가 도달하는 데에 걸리는 시간을 이용해 거리를 추정하는 방식으로, 더 높은 신뢰도를 보이지만 송/수신 양측의 정밀한 시간 동기화가 요구되며 많은 양의 신호를 처리할 수 있는 프로세서를 요구한다는 점에서 비용, 복잡도가 상대적으로 더 크다는 단점이 있다. 때문에 본 논문에서는 거리 기반 측위 기반기술로 RSS를 선정하였다.

1) RSS 기반 거리 추정(Distance Estimation)

RSS 기반 측위에서 가장 큰 문제는 거리추정간 사용되는 RSS 측정에 대한 환경적인 영향이다. RSS 측정간 2가지 환경적인 요인에 의해 전파 영역에서 오차가 발생하게 되는데, 첫째는 멀티패스 페이딩(Multi-path fading), 두 번째는 쉐도잉(Shadowing)이다[12]. 멀티패스 페이딩은 신호가 다양한 경로를 통해 여러 신호들로 수신단으로 도착하여 발생하는 현상으로 Small scale fading이라고도 불리운다. 다양한 경로로 오는 각 신호들은 각각 다른 세기와 위상을 가지고 도착하며 보강간섭 또는 상쇄간섭을 일으켜 멀티패스 페이딩을 일으킨다. 쉐도잉은 환경적인 요인으로 수신되는 신호에 손실이 일어나는 현상을 가리킨다. 위 두 가지 요인 중 멀티패스 페이딩은 여러 전파 손실 완화(Mitigation) 기법으로 감소시킬 수 있으며, 무선 거리추정에서 매우 적은 영향만을 끼친다. 때문에 본 논문에서는 무선 거리추정에서 멀티패스 페이딩에 대한 영향은 무시하고 쉐도잉의 영향만을 고려한다.

거리 추정을 위해 송신된 신호는 수신단까지의 거리에 비례하여 감소한다고 알려져 있다. 송신단과 수신단의 거리가 일정한 상황에서, 쉐도잉의 랜덤한 특성 때문에 수신된 신호의 세기는 특정한 평균값을 가지며 그 평균값을 중심으로 쉐도잉의 표준편차만큼 가우시안(Gaussian) 분포를 따르게 된다. 가우시안 모델을 사용할 경우 i 번째 노드와 j번째 노드로부터 수신한 신호의 세기는 아래와 같이 표현할 수 있다[13].

$$P_{ij} = P_0 - 10\gamma \log_{10}(d_{ij}/d_0) + S, S \sim N(0, \sigma_{RSS}) \quad (2.4)$$

여기서 $P_{i,j}$는 수신신호 세기의 평균[dB], P_0는 기준거리에서 수신된 신호의 세기[dB], γ는 환경에 따라 변하는 경로손실 지수(Path-loss exponent)를 의미하며 S는 로그노말(Log-normal) 쉐도잉과 같은 데시벨 단위의 라지 스케일 페이딩을 의미하며 σ_{RSS}는 그 표준편차를 의미한다. 노드간 실제 거리가 d_{ij}로 주어졌을 때 노드간 추정된 거리는 아래 식과 같다.

$$\hat{d}_{ij} = 10^{(P_0 - P_{ij})/10\gamma} \quad (2.5)$$

위 거리추정 방정식을 정의하기 위해서는 채널 파라미터 중 기준거리(통상 1m)에서의 전력 손실 값인 P_0와 경로손실 지수인 γ을 실험을 통해 검증하고 얻어내야 한다. 이는 RSS로 정확한 거리를 추정하기 위해 반드시 선행되어야 하는 과정이다. 본 논문에서는 [13]에서의 실험을 통해 얻어낸 그림 2.7의 3가지 현실적인 실외 환경(Grass, Sparse tree, Dense tree)의 경험적 경로손실 방정식을 참고하여 P_0와 환경별 γ 값, 다수의 실험을 통해 파악된 환경별 통계치 σ_{RSS}의 값을 표 2-1과 같이 얻었다.

Environment	P_0 [dB]	γ	σ_{RSS} [dB]
Grass	59.44	2.55	3.84
Sparse tree	60.84	3.34	7.3
Dense tree	52.14	4.02	7.75

표 2-1 환경별 경험적 경로손실 방정식 파라미터

그림 2.7 3가지 실외 환경(Grass, Sparse tree, Dense tree)

2) 최소제곱법(Least Square, LS)

거리 기반 측위에서는 타겟의 위치를 추정하기 위해 위치를 알고 있는 노드인 앵커로부터 타겟까지의 RSS 기반 거리추정 데이터가 차원에 따라 최소 3개(2-D), 4개(3-D)가 필요하다. 이 때 거리추정 정보가 3개이면 삼변측량(Trilateration)을, 4개 이상이면 최소제곱법을 수행하는 것이 가장 간단하고 널리 수행되는 방법이다.[14] 이는 각 앵커의 위치로부터 타겟까지의 추정된 거리를 반지름으로 하는 원들의 방정식을 이용해 타겟의 위치를 추정하는 방식이다. 앵커 수가 3인 경우 2-D 공간에서의 최소제곱법을 예시로 설명하면 그림 2.8과 같다.

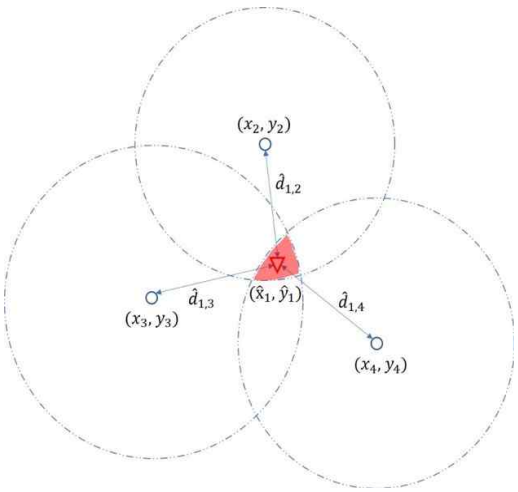

그림 2.8 최소제곱법의 원리(2-D 공간에서 앵커 수가 3일 경우)

수학적으로 간단하게 수식을 통해 살펴보면 아래와 같다. N 사이즈의 네트워크에서 위치를 알 수 없는 노드의 개수가 m개, 거리 추정이 가능한 거리 내 위치한 앵커의 개수가 $N-m$ 개라고 할 때, i 번째 타겟 노드의 위치를 추정하기 위해서는 j 번째 앵커와의 추정거리 $\hat{d}_{ij}$들을 이용해 다음과 같은 최소 3개의 원의 방정식을 얻어 구할 수 있다.

$$\begin{cases} (x_i - x_1)^2 + (y_i - y_1)^2 = \hat{d}_{i1} \\ (x_i - x_2)^2 + (y_i - y_2)^2 = \hat{d}_{i2} \\ \cdots \\ (x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 = \hat{d}_{ij} \\ \cdots \\ (x_i - x_{N-m})^2 + (y_i - y_{N-m})^2 = \hat{d}_{iN-m} \end{cases} \tag{2.6}$$

위 식에서 i 번째 타겟의 최소제곱법을 위한 기준이 되는 참조앵커를 r_i 번째 앵커라고 하고, 주어진 원의 방정식들을 순서대로 다른 방정식들과 빼면 **Ax = B** 으로 선형 표현이 가능하다. **A**와 **B**는 아래 식 2.7과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}\vec{A}_i &= [x_j - x_{r_i}, y_j - y_{r_i}] \\ \vec{B}_i &= \frac{1}{2}[\hat{d}_j - \hat{d}_{r_i} - x_{r_i}^2 - y_{r_i}^2 + x_j^2 + y_j^2]\end{aligned} \tag{2.7}$$

이후 타겟의 추정위치 $\overrightarrow{X_i} = [\hat{x}_i, \hat{y}_i]^T$에 대한 선형방정식 표현을 식 2.8과 같이 얻을 수 있다.

$$\vec{X}_i = (\vec{A}_i^T \vec{A}_i)^{-1} \vec{A}_i^T \vec{B}_i = [\hat{x}_i, \hat{y}_i]^T, i = 1,2, \dots m \tag{2.8}$$

최소제곱법에서 **A**는 정방행렬이 아니므로 역행렬이 존재하지 않는다. 위의 식에서 **A**에 대한 항은 의사역행렬이라 한다.

최소제곱법은 추정된 거리값들이 비슷하게 작은 오차 수준을 가지고 있을 경우 큰 문제가 없다. 하지만 사용된 추정된 거리 중 1개의 값이 아주 큰 오차를 포함하고 있을 경우, 이 값을 포함하지 않고 있을 경우보다 오차가 크게 발생한다. 이런 큰 추정오차를 유발하는 추정거리를 찾아 제거하는 것은 추가적인 복잡한 알고리즘을 필요로 한다.

3) 다차원척도법(Multi-dimensional Scaling, MDS)

다차원척도법(이하 MDS)은 다차원 상의 관측값 또는 개체들간의 비유사성(Dissimilarity)/유사성(Similarity)을 거리 정보로 사용하여 n-디멘션 공간의 개체들 사이의 구조를 나타내는 기술이다. [15], [16] MDS에는 거리 정보의 특성에 따라 Classic MDS, Metric MDS, Non-Metric MDS 등 여러 종류가 있다. d-디멘션 공간 내에서 N개의 노드로 구성된 네트워크가 주어졌을 때, 알고리즘은 w_{ij}가 측정치 $\hat{d}_{ij}$의 품질을 정의하는 가중치, d_{ij}가 유클리드 거리인 다음 Majorizing 함수 S를 아래와 같이 최소화함으로써 전체 노드들과 앵커들의 좌표를 추정한다.

$$\min_{\vec{X}_i}(S(\vec{X}_i)) = \min_{\vec{X}_i} \sum_{i<j<N} w_{ij} (\hat{d}_{ij} - d_{ij}(\vec{X}_i))^2 \tag{2.9}$$

거리 기반 측위에 사용될 수 있는 대표적인 Metric MDS인 Classic MDS는 Centered squared dissimilarity matrix의 Singular value decomposition(SVD)에 의해 하나의 솔루션을 제공한다. 하지만 노이즈가 있는 시나리오에서 비유사성들을 측정할 경우, 보통 비유사성들과 거리의 Loss function을 반복적으로 최소화하는 것에 기초하는 다른 기법을 사용해야 한다. 이런 기법은 Alternating nonlinear least squares (ALSCAL), Majorizing functions을 이용한 비선형 최소제곱법 (SMACOF), Nonmetric scaling 또는 Maximum likelihood formulations 과 같은 기법을 포함한다. [15], [16]

MDS의 수학적 원리를 WSN 측위의 예시를 들어 간단히 설명하면 아래와 같다. 먼저 네트워크 내 N 개의 타겟 노드들의 좌표를 $\vec{x}_1, \vec{x}_2, \ldots, \vec{x}_N$ 이라 할 때, 개체간의 거리정보 $d_{ij} = \| \vec{x_i} - \vec{x_j} \|$ 를 이용하여 측위가 이뤄질 요소들의 거리행렬 $\mathbf{D}$을 얻는다. 거리행렬은 대각성분이 모두 0이고 좌우 대칭을 이루는 행렬로 아래 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} 0 & d_{12} & d_{13} & \cdots & d_{1n} \\ d_{21} & 0 & d_{23} & \cdots & d_{2n} \\ d_{31} & d_{32} & 0 & \ddots & d_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ d_{n1} & d_{n2} & d_{n3} & & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \|\vec{x_1} - \vec{x_1}\| & \|\vec{x_1} - \vec{x_2}\| & \|\vec{x_1} - \vec{x_3}\| & \cdots & \|\vec{x_1} - \vec{x_n}\| \\ \|\vec{x_2} - \vec{x_1}\| & \|\vec{x_2} - \vec{x_2}\| & \|\vec{x_2} - \vec{x_3}\| & \cdots & \|\vec{x_2} - \vec{x_n}\| \\ \|\vec{x_3} - \vec{x_1}\| & \|\vec{x_3} - \vec{x_2}\| & \|\vec{x_3} - \vec{x_3}\| & \ddots & \|\vec{x_3} - \vec{x_n}\| \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ \|\vec{x_n} - \vec{x_1}\| & \|\vec{x_n} - \vec{x_2}\| & \|\vec{x_n} - \vec{x_3}\| & & \|\vec{x_n} - \vec{x_n}\| \end{bmatrix} \tag{2.10}$$

계산을 위해 타겟의 추정위치 $\mathbf{X}$의 제곱으로 설정한 행렬 $\mathbf{B}$, 그리고 거리행렬 $\mathbf{D}$의 제곱을 아래 식 2.11, 2.12와 같이 표현할 수 있다.

$$\mathbf{B} = \mathbf{X}^{\mathbf{T}}\mathbf{X} = [\vec{\mathbf{x_1}}, \vec{\mathbf{x_2}}, \cdots, \vec{\mathbf{x_n}}]^T [\vec{\mathbf{x_1}}, \vec{\mathbf{x_2}}, \cdots, \vec{\mathbf{x_n}}] = \begin{bmatrix} \vec{\mathbf{x_1}} \cdot \vec{\mathbf{x_1}} & \vec{\mathbf{x_1}} \cdot \vec{\mathbf{x_2}} & \cdots & \vec{\mathbf{x_1}} \cdot \vec{\mathbf{x_n}} \\ \vec{\mathbf{x_2}} \cdot \vec{\mathbf{x_1}} & \vec{\mathbf{x_2}} \cdot \vec{\mathbf{x_2}} & \cdots & \vec{\mathbf{x_2}} \cdot \vec{\mathbf{x_n}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \vec{\mathbf{x_n}} \cdot \vec{\mathbf{x_1}} & \vec{\mathbf{x_n}} \cdot \vec{\mathbf{x_2}} & \cdots & \vec{\mathbf{x_n}} \cdot \vec{\mathbf{x_n}} \end{bmatrix}$$

$$= -\frac{1}{2} \begin{bmatrix} d_{11}^2 - \sum_i d_{1i}^2 - \sum_j d_{j1}^2 + \sum_i \sum_j d_{ij}^2 & d_{12}^2 - \sum_i d_{1i}^2 - \sum_j d_{j2}^2 + \sum_i \sum_j d_{ij}^2 & \cdots & d_{1n}^2 - \sum_i d_{1i}^2 - \sum_j d_{jn}^2 + \sum_i \sum_j d_{ij}^2 \\ d_{21}^2 - \sum_i d_{2i}^2 - \sum_j d_{j1}^2 + \sum_i \sum_j d_{ij}^2 & d_{22}^2 - \sum_i d_{2i}^2 - \sum_j d_{j2}^2 + \sum_i \sum_j d_{ij}^2 & \cdots & d_{2n}^2 - \sum_i d_{2i}^2 - \sum_j d_{jn}^2 + \sum_i \sum_j d_{ij}^2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{n1}^2 - \sum_i d_{ni}^2 - \sum_j d_{j1}^2 + \sum_i \sum_j d_{ij}^2 & d_{n2}^2 - \sum_i d_{ni}^2 - \sum_j d_{j2}^2 + \sum_i \sum_j d_{ij}^2 & \cdots & d_{nn}^2 - \sum_i d_{ni}^2 - \sum_j d_{jn}^2 + \sum_i \sum_j d_{ij}^2 \end{bmatrix} \tag{2.11}$$

$$\mathbf{D^2} = \begin{bmatrix} 0 & d_{12}^2 & d_{13}^2 & \cdots & d_{1n}^2 \\ d_{21}^2 & 0 & d_{23}^2 & \cdots & d_{2n}^2 \\ d_{31}^2 & d_{32}^2 & 0 & \ddots & d_{3n}^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ d_{n1}^2 & d_{n2}^2 & d_{n3}^2 & & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \|\overrightarrow{\mathbf{x_1}} - \overrightarrow{\mathbf{x_1}}\|^2 & \|\overrightarrow{\mathbf{x_1}} - \overrightarrow{\mathbf{x_2}}\|^2 & \|\overrightarrow{\mathbf{x_1}} - \overrightarrow{\mathbf{x_3}}\|^2 & \cdots & \|\overrightarrow{\mathbf{x_1}} - \overrightarrow{\mathbf{x_n}}\|^2 \\ \|\overrightarrow{\mathbf{x_2}} - \overrightarrow{\mathbf{x_1}}\|^2 & \|\overrightarrow{\mathbf{x_2}} - \overrightarrow{\mathbf{x_2}}\|^2 & \|\overrightarrow{\mathbf{x_2}} - \overrightarrow{\mathbf{x_3}}\|^2 & \cdots & \|\overrightarrow{\mathbf{x_2}} - \overrightarrow{\mathbf{x_n}}\|^2 \\ \|\overrightarrow{\mathbf{x_3}} - \overrightarrow{\mathbf{x_1}}\|^2 & \|\overrightarrow{\mathbf{x_3}} - \overrightarrow{\mathbf{x_2}}\|^2 & \|\overrightarrow{\mathbf{x_3}} - \overrightarrow{\mathbf{x_3}}\|^2 & \ddots & \|\overrightarrow{\mathbf{x_3}} - \overrightarrow{\mathbf{x_n}}\|^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ \|\overrightarrow{\mathbf{x_n}} - \overrightarrow{\mathbf{x_1}}\|^2 & \|\overrightarrow{\mathbf{x_n}} - \overrightarrow{\mathbf{x_2}}\|^2 & \|\overrightarrow{\mathbf{x_n}} - \overrightarrow{\mathbf{x_3}}\|^2 & & \|\overrightarrow{\mathbf{x_n}} - \overrightarrow{\mathbf{x_n}}\|^2 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \overrightarrow{\mathbf{x_1}} \cdot \overrightarrow{\mathbf{x_1}} + \overrightarrow{\mathbf{x_1}} \cdot \overrightarrow{\mathbf{x_1}} - 2\overrightarrow{\mathbf{x_1}} \cdot \overrightarrow{\mathbf{x_1}} & \overrightarrow{\mathbf{x_1}} \cdot \overrightarrow{\mathbf{x_1}} + \overrightarrow{\mathbf{x_2}} \cdot \overrightarrow{\mathbf{x_2}} - 2\overrightarrow{\mathbf{x_1}} \cdot \overrightarrow{\mathbf{x_2}} & \cdots & \overrightarrow{\mathbf{x_1}} \cdot \overrightarrow{\mathbf{x_1}} + \overrightarrow{\mathbf{x_n}} \cdot \overrightarrow{\mathbf{x_n}} - 2\overrightarrow{\mathbf{x_1}} \cdot \overrightarrow{\mathbf{x_n}} \\ \overrightarrow{\mathbf{x_2}} \cdot \overrightarrow{\mathbf{x_2}} + \overrightarrow{\mathbf{x_1}} \cdot \overrightarrow{\mathbf{x_1}} - 2\overrightarrow{\mathbf{x_2}} \cdot \overrightarrow{\mathbf{x_1}} & \overrightarrow{\mathbf{x_2}} \cdot \overrightarrow{\mathbf{x_2}} + \overrightarrow{\mathbf{x_2}} \cdot \overrightarrow{\mathbf{x_2}} - 2\overrightarrow{\mathbf{x_2}} \cdot \overrightarrow{\mathbf{x_2}} & \cdots & \overrightarrow{\mathbf{x_2}} \cdot \overrightarrow{\mathbf{x_2}} + \overrightarrow{\mathbf{x_n}} \cdot \overrightarrow{\mathbf{x_n}} - 2\overrightarrow{\mathbf{x_2}} \cdot \overrightarrow{\mathbf{x_n}} \\ \overrightarrow{\mathbf{x_3}} \cdot \overrightarrow{\mathbf{x_3}} + \overrightarrow{\mathbf{x_1}} \cdot \overrightarrow{\mathbf{x_1}} - 2\overrightarrow{\mathbf{x_3}} \cdot \overrightarrow{\mathbf{x_1}} & \overrightarrow{\mathbf{x_3}} \cdot \overrightarrow{\mathbf{x_3}} + \overrightarrow{\mathbf{x_2}} \cdot \overrightarrow{\mathbf{x_2}} - 2\overrightarrow{\mathbf{x_3}} \cdot \overrightarrow{\mathbf{x_2}} & \ddots & \overrightarrow{\mathbf{x_3}} \cdot \overrightarrow{\mathbf{x_3}} + \overrightarrow{\mathbf{x_n}} \cdot \overrightarrow{\mathbf{x_n}} - 2\overrightarrow{\mathbf{x_3}} \cdot \overrightarrow{\mathbf{x_n}} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ \overrightarrow{\mathbf{x_n}} \cdot \overrightarrow{\mathbf{x_n}} + \overrightarrow{\mathbf{x_1}} \cdot \overrightarrow{\mathbf{x_1}} - 2\overrightarrow{\mathbf{x_n}} \cdot \overrightarrow{\mathbf{x_1}} & \overrightarrow{\mathbf{x_n}} \cdot \overrightarrow{\mathbf{x_n}} + \overrightarrow{\mathbf{x_2}} \cdot \overrightarrow{\mathbf{x_2}} - 2\overrightarrow{\mathbf{x_n}} \cdot \overrightarrow{\mathbf{x_2}} & & \overrightarrow{\mathbf{x_n}} \cdot \overrightarrow{\mathbf{x_n}} + \overrightarrow{\mathbf{x_n}} \cdot \overrightarrow{\mathbf{x_n}} - 2\overrightarrow{\mathbf{x_n}} \cdot \overrightarrow{\mathbf{x_n}} \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} b_{11} + b_{11} - 2b_{11} & b_{11} + b_{22} - 2b_{12} & \cdots & b_{11} + b_{nn} - 2b_{1n} \\ b_{22} + b_{11} - 2b_{21} & b_{22} + b_{22} - 2b_{22} & \cdots & b_{22} + b_{nn} - 2b_{2n} \\ b_{33} + b_{11} - 2b_{31} & b_{33} + b_{22} - 2b_{32} & \ddots & b_{33} + b_{nn} - 2b_{3n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ b_{nn} + b_{11} - 2b_{n1} & b_{nn} + b_{22} - 2b_{n2} & & b_{nn} + b_{nn} - 2b_{nn} \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

이후 식 2.13과 같이 Centering matrix **C**를 정의하고, 이를 이용해 식 2.14와 같이 대칭행렬인 **B**에 대한 Eigenvalue decomposition을 실시하면

$$\mathbf{C} = \mathbf{I_N} - \frac{1}{\mathrm{N}} \begin{pmatrix} 1 & \cdots & 1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & \cdots & 1 \end{pmatrix} \quad (2.13)$$

$$\mathbf{B} = -\frac{1}{2}\mathbf{C}\mathbf{D^2}\mathbf{C} = \boldsymbol{V\Lambda V^T} = \boldsymbol{X^T X} \quad (2.14)$$

과 같이 표현할 수 있다. 따라서 MDS를 통한 N개의 타겟 노드들의 추정위치 **X**는 식 2.15와 같이 구해진다.

$$\therefore \mathbf{X} = [\overrightarrow{\mathbf{x_1}}, \overrightarrow{\mathbf{x_2}}, \cdots, \overrightarrow{\mathbf{x_n}}] = \boldsymbol{\Lambda^{\frac{1}{2}} V^T}. \quad (2.15)$$

그림 2.9는 위 과정을 통해 특정 국가들의 수도의 2-D 위치를 좌표로 취하는 요소들의 거리행렬과 그를 통해 MDS를 실시하여 얻어낸 2-D 상의 상대적 배치 맵을 나타낸 것이다. 이 상태의 시각화 맵은 상대적 배치만을 나타내고 있으므로 노드간 절대적 위치정보를 나타내는 맵으로 바꾸기 위해서는 아래 두 문제를 해결해야 한다. 첫 번째는 Rotation 문제이고 두 번째는 Translation 문제이다. 이 문제들을 해결하기 위해 글로벌 위치정보를 알고 있는 앵커가 요구된다.

	이집트	프랑스	인도	이스라엘	일본	중국	러시아	미국
이집트	0	3310	4920	613	9679	6878	6592	10970
프랑스	3310	0	7364	3270	9844	8017	6217	7661
인도	4920	7364	0	4532	5956	2982	4983	13568
이스라엘	613	3270	4532	0	9079	6316	5984	10853
일본	9679	9844	5956	9079	0	3045	3627	10144
중국	6878	8017	2982	6316	3045	0	2853	11640
러시아	6592	6217	4983	5984	3627	2853	0	8881
미국	10970	7661	13568	10853	10144	11640	8881	0

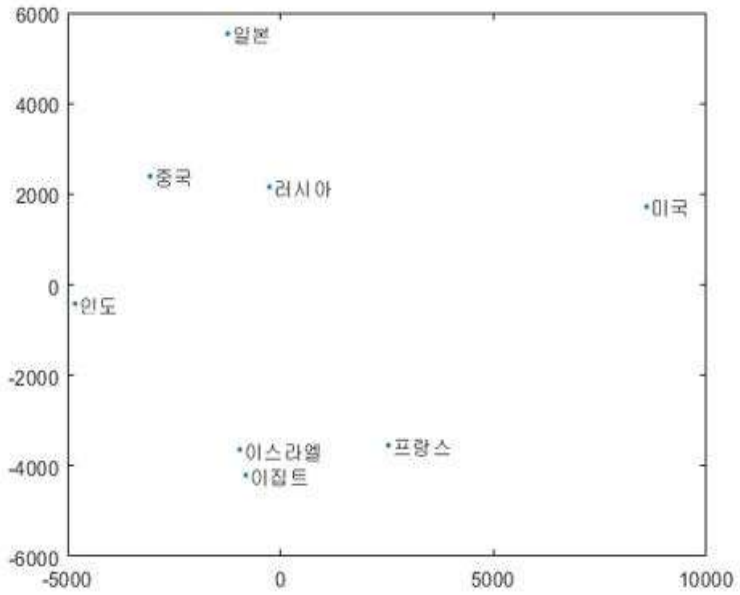

그림 2.9 국가간 직선거리 정보(km)를 토대로 제작된 거리 행렬(위)을 기반으로 MDS를 통해 2D 상에 상대적 위치를 나타낸 그래프(아래)

먼저 Rotation 문제는 상대 배치를 절대 배치와 동일하도록 회전 시키는 문제이다. 문제 해결을 위해 먼저 최소 3개(2-D)의 앵커들이 필요하다. 이들의 무게중심을 구한 뒤, 해당 차원의 Centering 행렬을 이용하여 원점의 좌표로 이동시킨다. 이후 원점 부근으로 이동한 앵커들의 위치정보를 이용해 Rotation 행렬을 생성한다. 만약 원점 부근으로 이동한 앵커들의 트루 좌표를 $[(x_1,y_1),(x_2,y_2),(x_3,y_3)]$, 원점 부근으로 이동한 MDS계산 이후의 앵커들의 좌표를 $[(x_1',y_1'),(x_2',y_2'),(x_3',y_3')]$라 하면 Rotation 행렬은

$$P_o = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & x_3 \\ y_1 & y_2 & y_3 \end{bmatrix}, \quad P_s = \begin{bmatrix} x_1' & x_2' & x_3' \\ y_1' & y_2' & y_3' \end{bmatrix}$$
$$R_{os} = P_o P_s^T (P_s P_s^T)^{-1} \tag{2.14}$$

과 같이 구할 수 있다. 이 Rotation 행렬을 앵커를 제외한 다른 노드들의 1차 MDS 계산 결과에 적용시키면 그림 2.10과 같이 Rotation 문제를 해결할 수 있다.

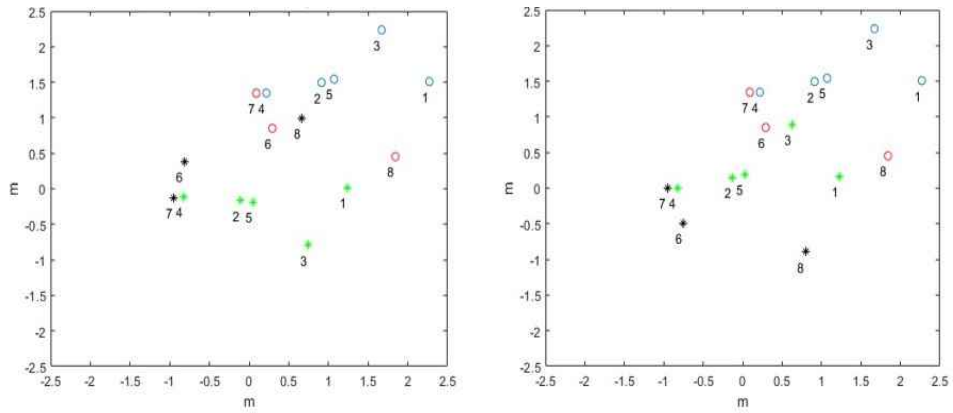

그림 2.10 1차 MDS가 종료된 앵커(적색)와 노드(청색)들의 추정위치 (흑 - 앵커, 녹 - 노드)(왼쪽), 회전을 적용한 결과(오른쪽)

Translation 문제는 위의 Rotation 문제 해결 후, 앵커의 트루 좌표와 계산된 앵커의 좌표의 차를 통해 방향 벡터 $\overrightarrow{t_{os}} = \overline{P_o - R_{os}P_s}$ 를 구해 해결된다. 해결 모습은 그림 2.11과 같다.

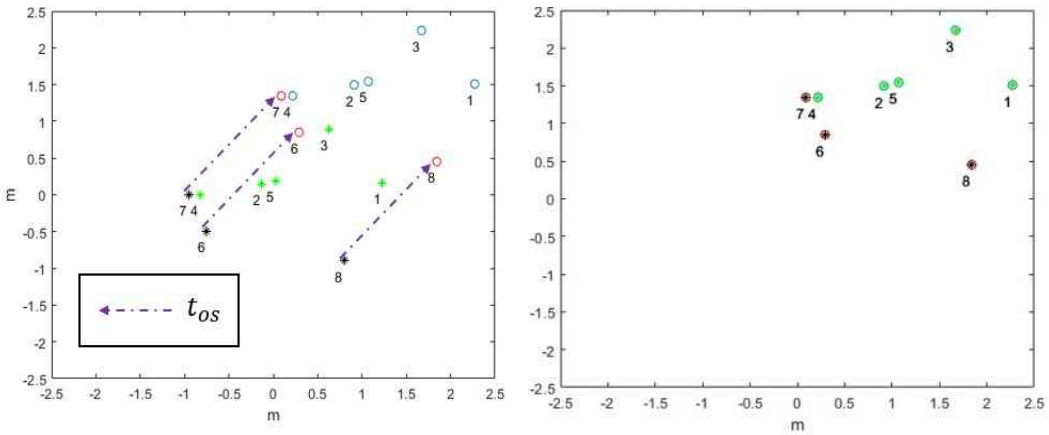

그림 2.11 Translation 벡터를 통한 Translation 문제 해결

제 3 장 제안 실외 측위 전략

이 장에서는 앞 장에서 소개한 시나리오의 특징과 측위 기반기술을 토대로 구성한 제안 실외 측위 전략을 소개한다. 주요 아이디어는 다음과 같다.

1. RSS와 PDR의 결합

MANET의 이동 상태에 따라 RSS와 PDR을 함께 혹은 따로 사용한다. RSS의 저비용 장점, PDR의 단기간 측위시 높은 정확도 장점을 취한다.

2. RSS 거리추정 정확도 향상

네트워크의 특징인 통신범위(R)와 RSS 거리추정에 사용되는 패킷 수를 이용해 RSS 거리추정 정확도를 향상시킨다.

3. 모바일 단일 앵커 측위

하나의 모바일 앵커를 이용해 가상앵커를 추가로 배치하여 앵커 수 부족 문제를 해결한다

제안 전략은 GPS 제한이 발생한 시점에 시작된다. 첫 번째 단계는 GPS 제한 발생 단계로, 이 순간 모든 노드는 마지막 가용 GPS 정보를 기반으로 트루 좌표를 IP 좌표로 취한다. 두 번째 단계는 개인 측위 단계로, IP와 CP, CP와 CP간 이동시 사용된다. 이 동안에 MANET의 지휘자는 물리적인 임무를 수행하며 다음 CP로 MANET의 이동을 이끈다. 물리적인 그룹 이탈 방지 메커니즘이 작동되며 이동하는 동안, 지휘자를 포함한 각 노드들은 PDR을 기반으로 자신에 대해 측위를 실시한다. 세 번째 단계는 MANET 측위 단계이다. CP에 도착하면 모든 노드들이 정지하며, 물리적인 장비체크/임무점검 등을 실시하는 동안 지휘자에 의해 모바일 단일 앵커 측위가 진행된다. 지휘자가 CP에 정확히 도착했다는 가정하에 지휘자는 누적된 PDR 오차를 0으로 만드는 트루 좌표로 자신의 위치를 추정하며, 그 위치를 포함해 노드들이 최소 3개의 앵커정보를 획득할 수 있는 위치들에서 RSS 비콘 패킷을 노드들을 향해 방송한다. 정지해있던 노드들은 노드당 활용할 수 있는 앵커 정보를 3개 이상 수신하면 본인의 측위를 실시하게 되고, 모든 노드의 측위가 완료되면 MANET이 다음 CP로의 이동을 시작한다. CP는 작전을 시작하기 이전

계획수립 단계에서 설정해둔 CP, 그리고 작전수행 중 지도 등으로 파악 가능한 주요 지형지물 등으로 적절한 간격마다 배치되어 있다고 가정한다. GPS가 다시 가용해질 시점, 또는 임무가 종료될 때까지 본 GPS 제한 시나리오에서의 실외 측위 전략이 지속 수행된다. 본 장의 하위 절에서는 제안된 실외 측위 전략의 주요 아이디어들이 세부적으로 설명된다.

제 1 절 RSS와 PDR의 결합

제 2장에서 살펴본 RSS와 PDR의 주요 장단점은 다음과 같다. 먼저 PDR과 RSS기반 측위는 아래와 같은 장/단점을 가지고 있다.

PDR 장점 ① 인프라에 영향을 받지 않음
② 높은 단기간 측위 정확도
단점 ① 정확한 시작지점 좌표 필요
② 시간이 늘어남에 따라 누적되는 측위 오차

RSS 장점 ① 저비용
② 단순한 알고리즘의 장점
단점 ① 페이딩과 노이즈에 민감함
② 최소 3개(2D)의 앵커가 필요하며 앵커의 수에 따라 정확도에 영향을 받는다

두 측위 기반기술의 장점들은 해당 기술들이 본 논문에서 고려하는 목표 시나리오에 적합하다 판단되어 채택된 이유이다. 각각의 단점을 극복하는 것이 제안 측위전략의 주요 문제라고 할 수 있다. 먼저 PDR의 첫 번째 단점은 GPS 제한 발생시 마지막으로 가용한 GPS 기반 정보로 트루 좌표를 취한다는 것으로 극복된다. 두 번째 단점은 인프라가 없는 환경을 고려해 이동 간에는 PDR로 측위를 진행하다가, 누적 PDR 오차가 너무 커지기 전에 CP에서의 RSS 기반 측위를 실시해 글로벌 좌표에 가까운 측위로 누적 오차를 보정한 후 다시 이동하는 것으로 극복된다. RSS의 첫 번째 단점은 제 2절에서의 거리추정 정확도 향상을 통해 극복되며, 두 번째 단점은 제 3절에서의 모바일 단일 앵커 측위로 극복된다.

제 2 절 RSS 거리추정 정확도 향상

RSS 기반 거리 추정 정확도를 높이는 방법은 여러 가지가 있으나, 에너지 소비를 최대한 낮게 유지하면서 원하는 정확도를 달성하는 것은 어려운 문제이다. [9]의 연구에서는 에너지 소비를 최소화하면서 목표하는 측위 정확도를 얻기 위해, 평균화(Normalize)된 RSS 샘플의 수와 RSS 측정이 수집되는 패킷의 전송 능력을 최적화함으로써 이러한 절충안을 활용했다.

RSS 기반 측위의 오차에 대한 크레이머-라오 하한(Cramer-Rao Lower Bounb, CRLB)은 식 3.1과 같이 도출되며 이는 정의에 따라 곧 Unbiased Estimatior가 달성할 수 있는 최소 분산을 나타낸다[9]. 로그 노말 채널 모델을 가정할 때, m개의 앵커(위치 : $(x_i,y_i), i=1,2,...,m$)와 위치 (x,y)를 가진 알 수 없는 하나의 타겟 노드로 구성된 네트워크에 대해 타겟의 위치를 $(\hat{x},\hat{y})$로 추정하는 측위의 CLRB는 아래와 같이 주어진다.

$$\sigma_{\text{crlb}}^2 = E[(\hat{x}-x)^2+(\hat{y}-y)^2] \geq \left(\frac{10\gamma}{\sigma_{RSS}\ln 10}\right)^2 \frac{\sum_{i=1}^{m} d_i^{-2}}{\sum_{i=1}^{m-1}\sum_{j=i+1}^{m}\left(\frac{d_{\perp ij}d_{ij}}{d_i^2 d_j^2}\right)^2} \qquad (3.1)$$

여기서 d_i는 타겟 노드와 i번째 앵커 사이의 거리이고, d_{ij}는 i번째와 j번째 앵커 사이의 거리이며, $d_{\perp ji}$는 i번째와 j번째 앵커를 연결하는 선분까지의 최단 거리이다. 여기서 γ는 경로손실 지수이고 σ_{RSS}는 RSS 측정의 표준 편차이다. 위 식에 있는 직관은 주어진 측위 영역내에서 더 많은 앵커들이 추가될 때 CRLB가 감소해야 하며, 노드와 앵커간 거리가 짧을수록 CRLB가 감소해야 한다는 것이다. 따라서 이 식은 RSS 기반 측위 오차의 대략적인 하한으로 사용될 수 있다.

n개의 패킷의 평균 RSS 값이 각 측위를 수행하는 데 사용되는 경우, σ_{RSS}는 아래 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_{RSS} = \sigma/\sqrt{n} \qquad (3.2)$$

여기서 σ는 패스로스 방정식 (2.4)에서의 쉐도잉으로 인한 표준 편차이다.

따라서 RSS 기반 측위의 정확도는 앵커의 위치, 타겟 노드의 위치, 채널 파라미터인 패스로스 지수(γ)와 쉐도잉(σ), 그리고 RSS 측정을 얻는데 사용되는 패킷의 개수(n)에 따라 달라진다. 여기서 우리는 패킷 n 을 증가시키는 데에 따른 정확도 향상을 고려하였다.

n개의 RSS 패킷으로 거리 추정이 진행되는 동안, 시스템 모델의 MANET의 특징인 통신 가능범위 R을 상한 임계값으로 사용한 필터링을 진행한다. 하나의 RSS 패킷으로 추정된 거리가 R을 초과하면 오차가 크게 작용된 추정치로 여기고 최종 거리 추정에 사용하지 않는다.

n개의 거리추정치에서 n_{disc} 만큼의 R을 초과한 거리 추정치들을 버린 뒤, 남은 거리값들의 평균화를 진행해 얻어낸 i번째 노드와 j번째 앵커의 추정거리는 아래식과 같다.

$$\hat{d}_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^{n-n_{disc}} \hat{d}_k}{n - n_{disc}} \tag{3.3}$$

위 거리 추정 정확도 향상의 성능을 점검하기 위해, 앞서 시스템 모델에서 소개한 3가지 환경(Grass, Sparse tree, Dense tree)에서 패킷 수 n를 늘려감에 따른 거리 추정 오차를 시뮬레이션 해보았다. 결과는 그림 3.1과 같다.

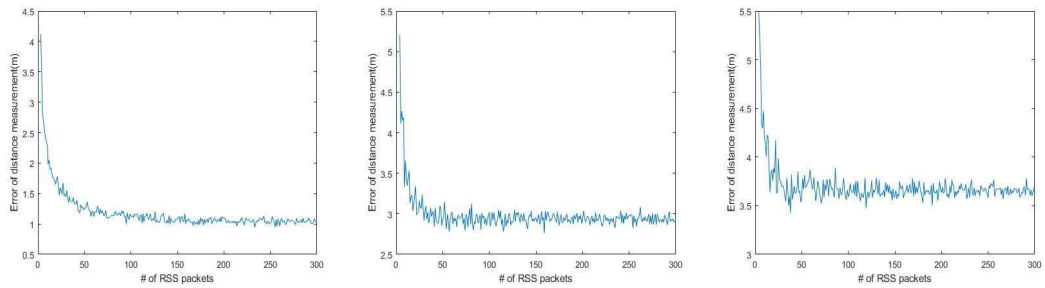

그림 3.1 3가지 지형(Grass, Sparse tree, Dense tree)별 패킷 수(n)에 따른 위치추정 오류

공통적으로 세 환경에서의 거리추정 오차는 특정 n개 이상의 RSS 측정부터는 Flat floor와 같이 수렴하는 모습을 보인다. 각 수렴하는 지점의 n 값은 표 3.1과 같다.

환 경	Grass	Sparse tree	Dense tree
수렴시점의 n값	81	52	47

표 3.1. 환경별 거리추정 오차가 수렴하는 시점의 n

주어진 시나리오에서 위 3가지 환경은 혼재하며, 노드와 노드 사이 전파 공간에도 3가지 환경이 혼재할 수 있다. 또한 잔디 환경에서는 50개 인근의 n값과 81개 인근의 n값 사이의 오차의 크기가 0.13m의 허용할 만한 크기이다. 때문에 본 논문에서는 모든 상황에서의 RSS 패킷 수 n을 50으로 설정하고 거리추정을 진행하였다.

제 3 절 모바일 단일 앵커 측위

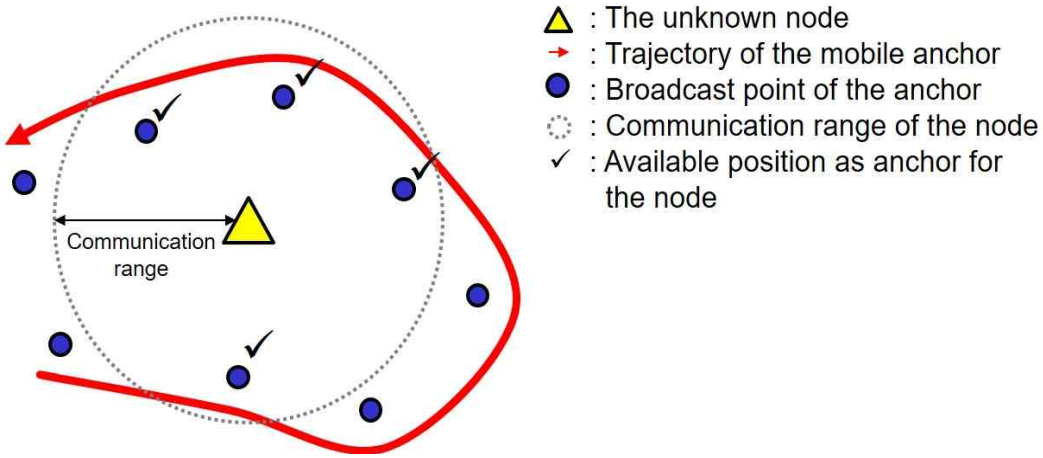

그림 3.2 모바일 단일 앵커 측위 개념도

CP에 도착한 지휘자는 CP의 트루 좌표를 취함으로써 유일하게 글로벌 좌표를 알고 있는 노드, 즉 앵커가 된다. 하지만 앞 장에서 살펴보았듯이 거리 기반 측위를 위해서는 2-D 공간에서 최소 3개의 앵커가 필요하다. 이런 시나리오에서 활용할 수 있는 측위 전략은 이동성이 있는 단일 앵커를 이용한 측위, 즉 모바일 단일 앵커 측위(Mobile single anchor localization)이다. 그림 3.2와 같이 지속적으로 자신의 위치를 높은 정확도로 알 수 있는 하나의 모바일 앵커(Mobile anchor, MA)가 최적의 지점에서 가상 앵커(Virtual anchor, VA)로서 거리추정을 위한 정보를 노드들에게 제공하는 것이다. [17]의 연구에서는 효과적인 측위를 위한 최적의 비콘, 즉 MA의 패킷 송신 위치에 대한 기준을 제시한다. 이동시간과 전력 소모를 고려해, 가장 효과적으로 최소한의 최초 앵커 배치(The 1st Anchor

deployment) 방법은 통신 가능범위(R) 만큼의 변의 길이를 가진 정삼각형을 형성하는 것이다. 본 논문의 시나리오에 적용하면 아래와 같이 진행된다.

1. MA는 CP의 위치에서 첫 번째 앵커, 트루 앵커에서 RSS 거리추정을 위한 비콘 신호를 송신한다.
2. MA는 이후 통신 가능범위 만큼의 변 길이를 가진 정삼각형을 이루는 2개의 VA 지점을 판단하고, PDR로 자신의 위치를 추정하며 해당 지점들로 이동해 각각 비콘 신호를 송신한다.

최초 3개의 앵커 배치 및 RSS 거리추정이 완료되면 3개의 앵커 모두의 통신 가능범위 내에 위치해 있어 측위가 가능해진 노드들이 발생한다. 앞선 2절에서의 정확도를 높인 거리추정을 신뢰한다고 가정하고, 측위가 실시된 노드들에게 추가적인 VA로서의 역할을 수행하도록 한다. 추가적인 VA들은 자신의 위치에서 다른 노드들에게 앵커로서의 정보를 주기 위해 MA가 했던 것처럼 비콘 신호를 송신해 거리추정 정보를 지원한다. 이런 식으로 측위 완료된 노드를 또다른 VA로 삼아 측위 범위를 확장하며 전체 MANET이 측위될 때까지 이어붙이며 진행하는 것을 스티칭(Stitching)이라고 한다. 진행 과정을 그림으로 나타내면 그림 3.3과 같다.

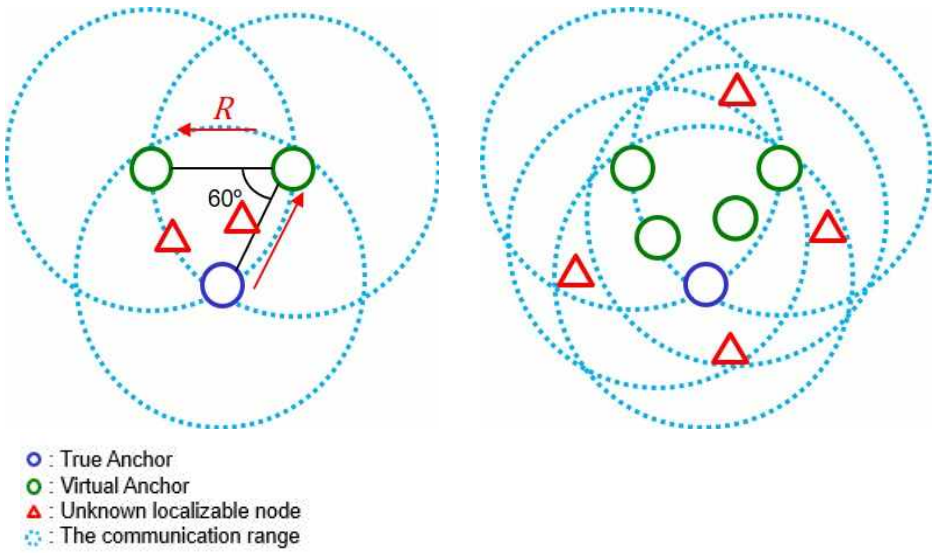

그림 3.3 최초 앵커배치와 최초 측위(왼쪽), 스티칭(오른쪽)

하지만 스티칭을 통해 모든 노드를 앵커로 삼아도 측위가 가능하지 않은, 즉 앵커 정보가 3개가 되지 않는 노드가 존재할 수 있다. 본 논문에서 모델링한 MANET은 노드별 자율성 때문에, 꼭 주변 노드가 3개가 되도록 움직이지는 않기 때문이다. 이 경우 MA가 해당 측위 불가 노드가 측위될 수 있도록 VA를 배치하는 추가 이동 전략이 필요하다. 이에 본 논문에서는 다음에 소개하는 기법을 적용하였다.

[18]에서는 기하학을 사용하여 측위 불가 노드가 MA에게 VA 생성 요청영역을 생성하여 멀티홉을 통해 전달하고, MA가 해당 위치로 이동 및 방송을 실시하여 추가적인 VA를 생성하는 MBAL(Mobile Beacon-Assisted Localization)이라는 기법을 소개한다. MBAL에서 측위 불가 노드는 가지고 있는 앵커 정보의 수에 따라 정의된다. 먼저 앵커 정보가 0개인 노드에 대해서는 물리적인 추가방안으로 다른 앵커들로 직접 노드를 이동시키거나 앵커 정보가 1개나 2개인 노드들에 대한 추가 VA 배치까지 모두 종료될 때까지 기다리는 전략이 수행된다. 앵커 정보가 1개나 2개인 노드에 대해서는 그림 3.4와 같이 최적의 VA위치를 계산하고, 현 MA의 위치에서 가장 가까운 위치로 이동하여 VA를 배치하게 된다.

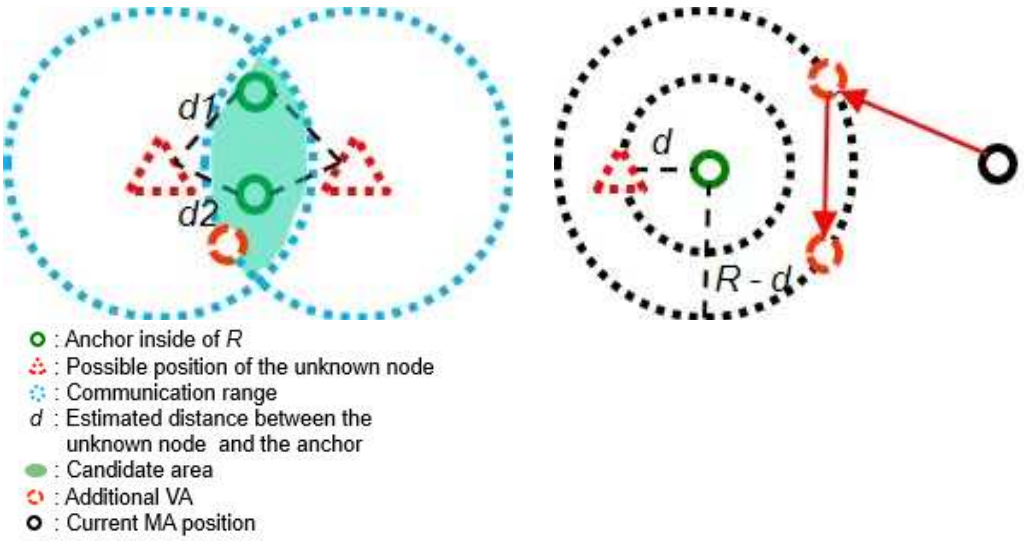

그림 3.4 앵커 정보가 2개(왼쪽), 1개(오른쪽)인 측위 불가 노드의 추가 VA 생성 요청영역

제 4 장 시뮬레이션 결과

3가지 현실적인 실외 환경에 대한 제안 실외 측위 전략의 성능을 서론에서 설정했던 목표(정확도, 에너지 효율, 속도)에 대하여 시뮬레이션을 통해 점검하였다. 시뮬레이션에 사용된 거리 기반 측위는 최소제곱법과 다차원척도법 2가지가 비교되었으며, 추가 앵커의 배치는 스티칭을 수행하는 제안 방법과 [18]의 MBAL로만 수행되는 스티칭 비실시 방법이 비교되었다. 시뮬레이션은 저속(0.3m), 보통(0.7m), 고속(0.85m)의 3가지 랜덤한 속도로 이동하는 각 노드들이 최대시간 $t_{\max}$ 동안 동일하게 계획된 C 개의 CP를 거쳐 이동한다. 통신 가능범위와 노드간 최소거리, 네트워크 사이즈 등 제 2장에서 설명한 시스템 모델과 3가지 환경에 대한 RSS 기반 거리추정 파라미터는 표 4-1에 제시되어 있다. 총 10,000번의 시뮬레이션이 진행된 후 평균값을 내어 결과를 얻어내었다.

Parameter		Environment		
		Grass	Sparse tree	Dense tree
Simulation	$t_{\max}$ [sec]	1000		
	N	10		
	C	3		
	R [m]	30		
	$d_{\min}$ [m]	5		
	n	50		
RSS based ranging	P_0 [dB]	59.94	60.84	52.14
	d_0 [m]	1		
	γ	2.55	3.34	4.02
	σ_{RSS} [dB]	3.84	7.3	7.75

표 4-1 시뮬레이션 파라미터

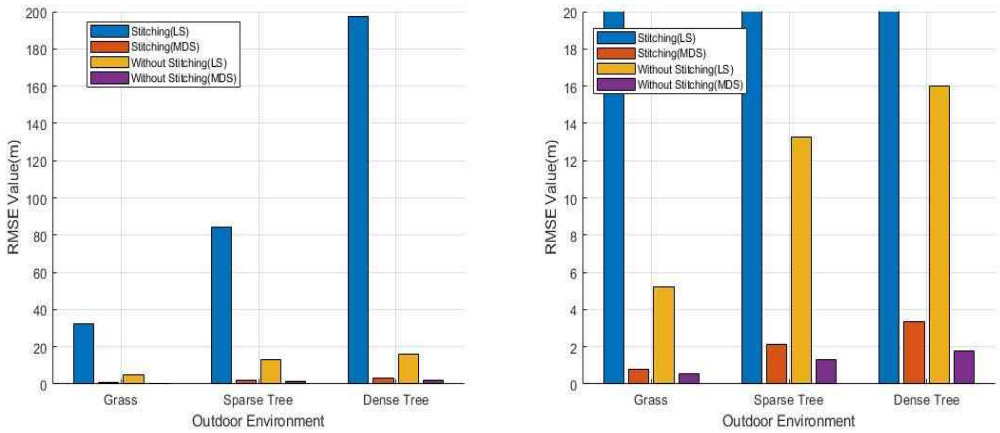

그림 4.1 거리기반 측위, 앵커 배치방법(스티칭 여부)별 측위 정확도 (RMSE) (왼쪽 - 축 제한 없음, 오른쪽 - y축 최대 20 제한)

먼저 CP별 MANET 측위단계에서의 거리기반 측위 기법과 앵커 배치 방법에 따른 측위 정확도 비교이다. 정확도 비교 척도는 RMSE(Root Meas Square Error)를 사용했다. 그림 4.1에 따르면 거리기반 측위 비교에서 다차원척도법(MDS)이 최소제곱법(LS)에 비해 훨씬 높은 측위 정확도를 보여준다. 최소제곱법은 하나의 노드를 측위 하는 데에 있어 하나의 타겟별로 인접한 j개의 앵커들과의 거리정보 j개만을 이용한다면 MDS는 거기에 j개의 앵커들간의 신뢰도 높은 거리정보 또한 추가되기 때문인 것으로 판단된다. 통상 연구에서도 MDS는 최소제곱법보다 높은 정확도를 보여온 것을 참고하면 신뢰할 만한 결과이다.

스티칭을 실시하는 것에 대한 정확도 차이는 스티칭을 실시하는 경우가 그렇지 않은 경우(MA가 직접 앵커를 배치하러 이동하는 MBAL)보다 측위 정확도가 더 높음을 보였다. 최소제곱법의 예를 들어 설명하면 오차를 내포한 노드 측위 결과를 앵커로 삼을수록 다음 단계 측위의 정확도가 크게 떨어지는 것을 원인이라 할 수 있다. 하지만 MDS를 적용한 경우 가장 거리추정 정확도가 떨어지는 Dense tree 환경에서 스티칭을 실시하지 않으면 약 2.12m의 측위 오차를, 스티칭을 실시하면 3.34m의 목표범위(1~5 m) 내의 측위 오차를 보였다. GPS 기반 측위의 신뢰도가 1~5m임을 감안하면 스티칭을 실시하는 방법 또한 허용 가능한 수준의 측위 오차로 판단된다.

구 분	Stitching	Without Stitching
전체 네트워크 측위완료까지 소모된 시간 [sec]	65.62	217.35
전체 네트워크 측위완료까지 MA가 이동한 거리 [m]	76.92	273.54
앵커가 배치된 수 (= RSS 측정을 실시한 수)	7.14	'11.06

표 4-2 스티칭 여부에 따른 측위 소모시간, MA의 이동거리, 총 배치된 앵커의 수

측위 완료를 위해 스티칭을 사용하는 것과 사용하지 않는 경우에 대해 측위 완료까지 소모된 시간/거리, 배치된 앵커의 수를 기반으로 에너지 소모와 측위 속도를 비교하였다. 거리기반 측위 기법으로 MDS를 선택한 후 획득한 데이터가 표 4-2에 제시되어 있다.

측위 완료까지 소모된 시간을 측위 속도의 기준으로 삼는다면 스티칭을 사용하는 경우는 스티칭을 사용하지 않는 경우보다 약 3배 빠른 측위 속도를 보인다. 이는 MA가 물리적으로 이동하는 것이 3개의 최소 앵커와 평균 1개 이하의 앵커정보 0개 이하인 노드를 위해 이동하는 것에 그치는 스티칭에 비해, 앵커 정보가 부족한 모든 노드에 대해 VA 추가 배치를 위해 이동해야 하는 스티칭 미실시 방법이 훨씬 많은 거리를 이동해야함에서 비롯된다.

에너지 소모는 측위 완료시까지 MA가 PDR을 사용하며 소모된 에너지와 RSS 기반 거리추정간 소모되는 에너지로 비교하였다. PDR 사용으로 소모되는 에너지는 스티칭의 경우 최초 앵커 배치동안만 PDR이 사용되고 이후에는 사용되지 않아 상대적으로 약 3.3배 적은 에너지를 소모한다. RSS 기반 거리추정간 소모되는 에너지는 RSS 거리추정간 이뤄지는 업링크 통신을 아래 식과 같이 모델링하여 계산하였다.

$$\begin{aligned} E_{radio} &= E_{TXbeacon} + E_{RXpos} \\ &= \frac{T_{tot}}{T}\left(V_{cc} I_{TX} t_{TXb}\right) + \frac{T_{tot}}{T}\left(V_{cc} I_{RX} t_{RXp}\right) \end{aligned} \tag{4.1}$$

총 RSS 거리추정을 통한 소모 에너지 E_{radio}는 앵커가 노드들에게 RSS 거리추정을 위한 비콘 신호를 송신하는 데에 소모되는 에너지 $E_{TXbeacon}$과 노드가 앵커정보를 수신해 거리기반 측위를 하는 데에 소모되는 에너지의 합으로 나타난다. 여기서 V_{cc}는 전압 공급, I_{TX}와 I_{RX}는 송수신 모드의 전류 소비, t_{TXb}는 비콘을 보내는 데 필요한 전송 모드 시간, t_{RXp}는 위치 패킷을 수신/전송하는 데 필요한 수신/전송 모드의 시간이다. 이러한 시간은 식 4.2와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} t_{TXb} &= nt_b \\ t_{RXp} &= t_p + t_{wait} \end{aligned} \tag{4.2}$$

여기서 t_b는 비콘의 지속 시간이고, t_p는 위치 정보 패킷의 지속 시간이며, t_{wait}는 모바일 노드가 위치 패킷을 수신하기 위해 수신 모드로 유지되는 시간이다. 전체 시간 T_{tot}와 RSS 측정 주기를 모두 1로 설정하면 n에 의존하는 RSS 기반 에너지 소모식은 아래와 같다.

$$f(n) = V_{cc} I_{TX} nt_b + V_{cc} I_{RX} \left(t_p + t_{wait} \right) \tag{4.3}$$

1-2절에서 제시한 참고 디바이스를 참고해 공급 전압과 송/수신모드의 전류 소비, 타이머등의 설정을 표 4-3과 같이 설정하였을 때, RSS 기반 에너지 소모는 스티칭을 사용한 경우가 약 1.53배 적은 에너지인 약 3.126 J을 소모했으며, 스티칭을 사용하지 않은 경우는 더 많은 RSS 비콘 송신으로 인해 4.486 J을 소모했다. 따라서 스티칭을 사용하는 경우가 더 빠른 측위 속도와 적은 에너지 소모를 보였다.

구 분	값
V_{cc} [V]	3.6
I_{TX} [A]	0.042
I_{RX} [A]	0.039
t_b [sec]	0.02
t_p [sec]	0.02
t_{wait} [sec]	1

표 4-3 RSS 기반 에너지 소모량 계산을 위해 사용된 파라미터

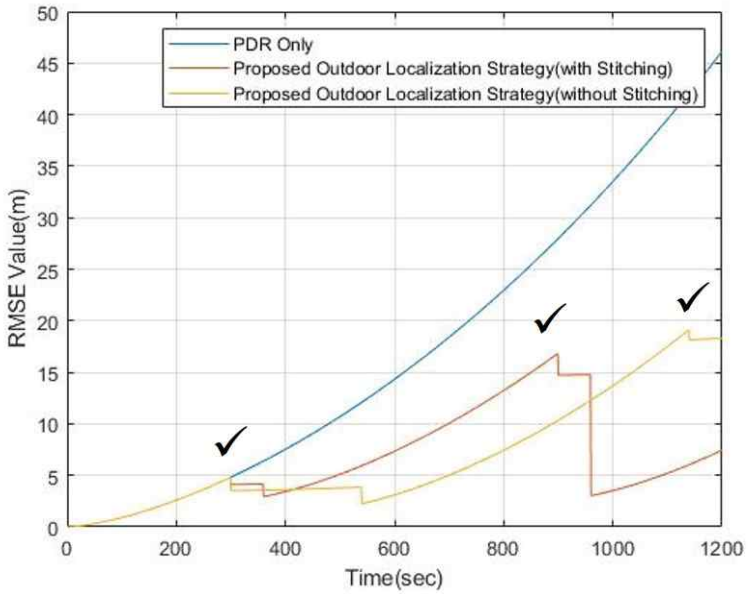

그림 4.2 Dense tree 환경에서 3가지 기법(PDR만 사용, 스티칭 적용한 제안 전략, 스티칭 적용하지 않은 제안 전략)를 사용했을 경우의 MANET의 이동시간 경과별 누적 측위 오차(RMSE)

스티칭을 사용했을 경우와 그렇지 않은 경우, PDR만 사용하는 경우의 경과시간별 측위 오차를 가장 측위 정확도가 떨어지는 Dense tree 환경에서 비교하였다. 그림 4.2는 MANET에 대한 시뮬레이션 1회 실시 결과에서 시간 경과별 측위 오차를 나타낸 것으로, 첫 번째 체크표시는 첫 번째 CP 도착 시점이다. 앵커의 트루 좌표화를 통해 약간의 측위 오차 개선(하락)특정 시간 동안 각각 스티칭과 MBAL에 의한 RSS 기반 측위가 진행된다. 스티칭을 사용한 경우는 그렇지 않은 경우보다 조금 오차 보정폭이 적지만, 측위 완료에 소요된 시간이 짧아 두 번째 CP에 도착한 시점(두 번째 체크표시)이 더 이르다. 하지만 스티칭을 사용하지 않은 경우는 측위 완료시까지 시간이 약 3.5배 더 소요되는 대신 오차 개선율이 좀 더 높다. 다만 시간이 더 많이 소요되므로 다음 CP에 도착하는 시간이 늦어지게 된다.

분석된 성능을 기반으로 군사/보안 분야의 애플리케이션 별로 어떤 측위 전략을 적용하는 것이 알맞은 지를 제시하였다. 첫 번째 시뮬레이션 결과를 기반으로 측위기법으로서 더 높은 정확도를 보이는 MDS를 선택

한 후, 스티칭 여부에 따른 제안 전략의 정확도, 에너지 소모, 시간 소모를 3가지 환경에 대해 평균치를 취해 요약하면 표 4-4와 같다.

구 분	Accuracy (RMSE) [m]	Energy consumption[J]	Time spent [sec]
Stitching	2.31	3.13	65.62
Without stitching	1.78	4.49	217.35

표 4-4 앵커 배치방법별 정확도/에너지소모/시간소모 비교

본 제안 전략이 사용될 군사/보안 분야의 애플리케이션과 애플리케이션별 요구 정확도, 에너지 소모, 시간 소모의 정도는 표 4-5와 같다.

구 분	정확도 요구정도	에너지 사용량 (장시간 소요여부)	측위시간 허용정도 (정지시간 허용)
수색/추적	5m 이하	많음	**급함**
행군/이동	5m 이하	**많음**	느긋함
평시 순찰/감시	5m 이하	**적음**	**느긋함**

표 4-5 군사/보안 분야 애플리케이션별 정확도/에너지/소모시간 요구

정확도 요구정도는 두 가지 제안 전략 모두 GPS 기반 측위와 동일하거나 조금 높은 수준인 5m이하의 수준을 충족하여 제안 실외 측위 전략은 CP의 멀지 않은 간격 배치를 통해 적절한 실시간으로 적절한 정확도를 얻어낼 수 있다.

수색/추적 상황에서는 에너지 사용량보다는 짧은 측위시간 허용정도를 통해 신속한 MANET의 지속 이동이 중요하다. 때문에 스티칭을 사용한 전략을 적용하는 것이 알맞다. 행군/이동 상황에서는 장기 시나리오가 될 경우가 많으므로 에너지 소모가 적은 스티칭을 적용하는 것이 알맞다. 순찰/감시처럼 한 시퀀스가 장기적이지도 않으면서 측위 시간 허용정도가 느긋한 시나리오에서는 보다 높은 정확도를 위해 스티칭을 사용하지 않은 전략이 채택될 수 있다.

제 5 장 결 론

본 논문에서는 GPS 사용중 제한사항이 발생한 상황에서 최종적으로 가용한 GPS 정보 기반 좌표를 시작지점으로 삼아 PDR, RSS 기반 측위를 실시하는 군사/보안 분야의 소규모 MANET을 위한 측위 전략을 제안하고 현실적인 3가지 실외 환경에서의 시뮬레이션을 통해 그 성능을 검증하였다. 목표한 시나리오에서 요구되는 저비용, Infra-free 특성을 고려하여 RSS 기반 측위, PDR의 두 측위 기반 기술을 채택하였고, 성능 척도로서 GPS에 근접한 5m 이하의 측위 정확도와 장기 시나리오를 고려한 에너지 효율, 측위 소요시간를 설정하여 그 성능을 비교하였다. 또한 시나리오의 상태에 따라 RSS 기반 거리추정을 통한 거리기반 측위와 PDR 기술을 융합 또는 각각 적용함으로써 서로 단독으로 사용했을 때 극복할 수 없었던 단점을 극복하는 전략을 제시하였다. RSS 거리추정간 사용되는 패킷 수를 늘리고 통신 가능범위를 사용한 거리추정치 필터링을 통해 거리추정 정확도를 높였으며, 패킷 수 증가에 따른 에너지 소모 증가를 앵커의 RSS 거리측정을 위한 비콘신호 방송 횟수를 최소화하는 모바일 싱글 앵커 측위를 통해 최소화하였다. 대표적인 실외 환경인 3가지 환경에서의 패스로스 방정식 대입을 통해 최적의 패킷 수를 도출하였으며, 그를 통해 얻어낸 거리정보를 거리기반 측위의 가장 대표적인 2가지 기법인 최소제곱법와 MDS에 적용하여 더 나은 MDS를 기반삼아 스티칭 사용여부로 구분되는 2가지 제안 실외 측위 전략의 정확도, 에너지, 측위 속도를 비교하여 목표 분야의 애플리케이션별 최적의 GPS 제한시 사용할 수 있는 실외 측위 전략을 제시하였다. 두 가지 제안 전략 모두 5m 이하의 측위 정확도를 보여 군사/보안분야의 현실적인 실외 환경 시나리오에서 GPS 제한시 활용할 수 있음이 검증되었다. 다양한 애플리케이션 조건에 따라서 패킷 수 측정, RSS 거리측정 디바이스의 성능, IMU의 성능, CP의 배치 빈도를 늘리거나 줄여 그 성능을 조절할 수 있어 더 넓은 애플리케이션에 활용할 수 있을 것으로 예상된다.

참 고 문 헌

[1] H. Hu and N. Wei, “A study of gps jamming and anti-jamming,” in 2009 2nd international conference on power electronics and intelligent transportation system (PEITS), vol. 1. IEEE, 2009, pp. 388 - 391.

[2] H. Sallouha, M. M. Azari, A. Chiumento, and S. Pollin, “Aerial anchors positioning for reliable rss-based outdoor localization in urban environments,” IEEE Wireless Communications Letters, vol. 7, no. 3, pp. 376 - 379, 2017.

[3] C. Bo, D. Ren, S. Tang, X.-Y. Li, X. Mao, Q. Huang, L. Mo, Z. Jiang, Y. Sun, and Y. Liu, “Locating sensors in the forest: A case study in greenorbs,” in 2012 Proceedings IEEE INFOCOM. IEEE, 2012, pp.1026 - 1034

[4] Hou, Xinyu, and Jeroen Bergmann. "Pedestrian dead reckoning with wearable sensors: A systematic review." IEEE Sensors Journal 21.1 (2020): 143-152.

[5] Jimenez, Antonio R., et al. "A comparison of pedestrian dead-reckoning algorithms using a low-cost MEMS IMU." 2009 IEEE International Symposium on Intelligent Signal Processing. IEEE, 2009.

[6] Kim, Jeong Won, et al. "A step, stride and heading determination for the pedestrian navigation system." Journal of Global Positioning Systems 3.1-2 (2004): 273-279.

[7] Schmid, Johannes, Wilhelm Stork, and Klaus D. Müller-Glaser. "Pedestrian Dead Reckoning as a complementary method for Wireless Sensor Network Ad-Hoc Person Localization.“

[8] Li, Zhenwei, et al. "An improved pedestrian navigation system using IMU and magnetometer." 2017 International Conference on Computer Systems, Electronics and Control (ICCSEC). IEEE, 2017.

[9] Tarrío, Paula, et al. "An energy-efficient strategy for combined RSS-PDR indoor localization." 2011 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops

(PERCOM Workshops). IEEE, 2011.
[10] Woodman, Oliver J. An introduction to inertial navigation. No. UCAM-CL-TR-696. University of Cambridge, Computer Laboratory, 2007.
[11] Tariq, Zain Bin, et al. "Non-GPS positioning systems: A survey." ACM Computing Surveys (CSUR) 50.4 (2017): 1-34.
[12] Sklar, Bernard. "Rayleigh fading channels in mobile digital communication systems. I. Characterization." IEEE Communications magazine 35.7 (1997): 90-100.
[13] Alsayyari, Abdulaziz, et al. "An empirical path loss model for wireless sensor network deployment in a dense tree environment." 2017 IEEE Sensors Applications Symposium (SAS). IEEE, 2017.
[14] Wang, Yue, et al. "Reference selection for hybrid TOA/RSS linear least squares localization." 2013 IEEE 78th vehicular technology conference (VTC Fall). IEEE, 2013.
[15] Shang, Yi, et al. "Localization from mere connectivity." Proceedings of the 4th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking & computing. 2003.
[16] Jia, Dan, et al. "An advanced distributed MDS-MAP localization algorithm with improved merging strategy." 2016 IEEE International Conference on Information and Automation (ICIA). IEEE, 2016.
[17] M. L. Sichitiu and V. Ramadurai, "Localization of Wireless Sensor Networks with a Mobile Beacon" in Proceedings of the First IEEE Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Systems (MASS 2004), Fort Lauderdale, USA, October 2004.
[18] Kim, Kyunghwi, and Wonjun Lee. "MBAL: A mobile beacon-assisted localization scheme for wireless sensor networks." 2007 16th International Conference on Computer Communications and Networks. IEEE, 2007.

Abstract

Outdoor Localization Strategy for Small Sized Mobile Ad-hoc Networks of Pedestrians in GPS-Restricted Scenario

Ja-Myoung Choi

Electrical and Computer Engineering

The Graduate School

Seoul National University

Outdoor localization is highly dependent on satellite communication-based localization, such as Global Positioning System(GPS). In the military/security field, its dependence is increasing. However, in case GPS becomes no longer available, an alternative outdoor localization strategy is required. In this paper, we tried to study outdoor positioning strategies in GPS restriction situations that can be used in mobile ad-hoc network(MANET) consisting of pedestrians. The Received Signal Strength(RSS)-based distance measurement techniques and Pedestrian Dead Reckoning(PDR) techniques are adopted, and simple localization

strategy that can be applied only by coordinates of the initial point(IP) and checkpoint(CP), and empirical path loss equations of the target environment is presented. The proposed localization strategy combines the advantages of RSS-based distance measurement and PDR to achieve the accuracy/energy/time requirements in the target scenario. In addition, the performance is verified by applying it to three realistic outdoor environments for target fields. It is expected that the proposed strategy can be applied in various ways in the military/security field and other fields.

keywords : Localization, RSS(Received Signal Strength), PDR(Pedestrian Dead Reckoning), MANET(Mobile Ad-hoc Network), Single Anchor Localization, LS(Least Square), MDS(Multi-dimensional Scaling)

Student Number **: 2021-26610**