

보행자 항법 및 차량 항법 기술

최근 보행자와 차량의 항법 정보(위치, 속도, 자세, 방위각, 등)는 기존의 편의(convenience) 목적의 활용뿐 아니라 안전(safety) 보장을 위한 기반 정보로 활용되고 있으며 이에 대한 원천기술 및 활용기술의 연구개발이 활발하게 이루어지고 있다. 본 고에서는 인프라 기반 및 센서 기반의 다양한 보행자/차량용 항법 기술과 항법용 융합 필터 기술을 설명하고 연구사례를 살펴보고자 한다.

■ 조성윤
(한국전자통신연구원)

I. 서론

항법 기술은 군용/항해용 기술에서 민용 기술로 이전되어 길 안내와 같은 편의 정보 제공 기술뿐 아니라 다양한 센서와의 융합을 통해 안전 정보 제공 기술로 사용되고 있다. 민용 항법 기술은 차량용 항법 기술로 시작하여 보행자 항법 기술로 그 응용 대상이 다양해지고 있으며 실외 항법 기술에서 실내 항법 기술로 기술의 응용범위가 확대되고 있다. 또한 GPS (Global Positioning System) 만으로 이루어지던 항법 기술이 위성항법 (GPS/GNSS: Global Navigation Satellite System) 및 다양한 인프라/센서와의 융합을 통한 복합항법기술로 기술의 다양화/융합화가 이루어지고 있다. 기술 개발은 곧 사업화로 이루어져 ITS (Intelligent Transportation System)/Telematics/LBS (Location Based Service) 등과 같은 항법정보 기반의 다양한 정보기술(IT: Information Technology)로 부가가치를 높이는 산업화가 되어 우리의 삶 속에 깊숙이 자리잡고 있다.

보행자 항법은 실내 항법을 위해 다양한 무선통신 인프라 기반으로 개발되고 있으며 그 중심에 IEEE 802.11 기반 Wi-Fi, IEEE 802.15.4a 기반 IR-UWB (Impulse Radio-Ultra Wideband)/CSS (Chirp Spread Spectrum) 등이 있다. Wi-Fi와 같이 우리 주위에 산재한 무선통신 인프라를 기반으로 다양한 위치 추정 알고리즘들이 연구 개발되고 있으며 사업화가 이루어져 스마트폰 상에서 GPS와 연계한 실내외 연속 항법기술로 선보이고 있다. IR-UWB 및 CSS는 정확한 위치추정을 위한 거리추정/통신이 가능

한 기술로 아직 범용 기술로 상용화가 이루어지지 않았지만 로봇, 보병/소방관, 물류 등과 같이 정확한 위치 추정을 요구하는 분야에 활용되는 목적으로 활발한 연구 개발이 이루어지고 있다. 이뿐 아니라 스마트폰에 탑재되어 있는 센서들을 활용한 PDR (Pedestrian Dead Reckoning) 기술이 전세계적으로 연구되고 있으며 이 기술은 위치추정용 인프라가 없는 실내에서 보행자의 정밀 위치추정에 활용될 수 있는 기술로 각광받고 있다. 이와 관련하여 저자의 연구 개발 현황을 소개한다.

차량 항법은 운전자의 편의뿐 아니라 안전 지원을 위해 필요한 기술로 위성항법/센서 복합항법기술로 개발되고 있다. 차량 간 및 차량과 인프라 간의 연결과 INS (Inertial Navigation System), 영상, 레이더, 레이저 스캐너 등을 융합한 복합항법 기술로 다양한 서비스를 목적으로 연구되고 있다. 이때 어떤 센서들의 융합이 이루어지는 것에 대한 연구도 중요하지만 센서 융합 방법에 대한 연구도 중요한 연구 테마 중 하나이다. 센서 융합에는 주로 융합 필터가 사용되며 칼만필터를 중심으로 다양한 형태의 필터가 연구 개발되고 있다. 본 저자는 선형/비선형 시스템용 필터 및 IIR (Infinite Impulse Response)/FIR (Finite Impulse Response) 필터, 적응형(adaptive) 필터 등을 연구하고 있으며 이에 대한 연구 동향을 소개한다.

II. 보행자 항법 기술

위성항법이 실외 범용 항법 기술로 사용되는 중요한 요인은

세 가지가 있다. 첫 번째는 인프라인 위성은 가시성(visibility)이 만족되는 전 세계 어느 곳에서나 위성항법 수신기와 통신을 할 수 있으며 이를 기반으로 수신기의 위치를 계산할 수 있다는 것이다. 그리고 두 번째는 수신기의 위치를 계산할 때 필요한 위성의 위치정보는 언제나 정확하게 획득할 수 있다는 것이다. 그리고 세 번째는 위치추정 정확도가 10m 이내로 민용 항법 기반 응용 분야에 적용하기 적합하다는 것이다 [1]. 이 세 가지 요인에 의해 실외 응용지역에서의 항법 기술로 위성항법이 독보적으로 사용되어오고 있으며 앞으로 그 역할은 계속될 것으로 전망된다. 그러나 위성신호를 수신할 수 없는 실내 응용지역에서는 아직까지 독보적인 항법기술이 대두되지 않고 다양한 대체 기술들이 연구 개발 및 응용되고 있다. 그 이유는 실내 응용지역에서 위성항법이 갖는 두 가지 주요 요인을 갖춘 기술이 아직 없기 때문이다. 본 장에서는 실내 응용지역에서 보행자를 위한 다양한 항법기술의 개발 현황을 분석하고 향후 개발 전망을 분석한다.

1. IEEE 802.11 기반 Wi-Fi를 활용한 보행자 항법 기술

Wi-Fi 기반의 실내의 보행자 항법 기술은 오랫동안 연구되어 오고 있으며 많은 응용이 이루어지고 있다. 그 이유는 무선통신 인프라 기반의 실내 항법 기술 중 위성항법이 갖는 주요 요인을 최대한 반영하는 인프라이기 때문이다. 첫 번째 Wi-Fi 를 개인용 무선통신 수단으로 활용하면서 수많은 AP (Access Point)를 전세계에서 자발적으로 설치하게 되었다. 이런 현상은 2009년 스마트폰 시장의 폭발 성장과 앱(Application) 홍수로 인해 더욱 활성화 되었다. 이제는 거의 대부분의 건물(실내 응용지역)에서 다수의 Wi-Fi용 신호를 수신할 수 있다. 즉 위성항법이 갖는 첫 번째 주요 요인이 만족된다. 이로 인해 다양한 위치추정 기술이 연구/활용되고 있다 [2, 3].

Cell-ID 기술은 가장 원초적이며 단순한 기술이지만 정확도의 범위를 확장하는 경우 온톨로지(ontology) 기반 위치정보를 표현하기에 가장 적합한 위치 추정 방법이다. 즉 현재 모바일 단말에서 수신할 수 있는 여러 Wi-Fi 신호 중 RSSI (Received Signal Strength Indication)가 가장 큰 신호의 송출 AP의 위치정보를 해당 단말의 위치정보로 나타내는 것이며 이때 필요한 AP의 위치정보는 해당 AP의 MAC (Media Access Control) 주소와 연계한 데이터베이스가 미리 구축되어 있어야 한다. 이때 AP의 위치정보는 개념적인 공간 정보(예: 서울시 강남구 삼성동 A Mall 1층 B 커피숍)로 데이터베이스화가 쉬우며 이 정보를 해당 단말의 위치정보로 제공함으로써 다양한 편의 활동에 도

움을 줄 수 있다. 이를 위해서 사전에 AP 데이터베이스가 구축되어야 하며 비로소 위성항법의 범용 활성화의 중요한 두 번째 요인을 무선항법 기술에서도 만족하게 된다. 서비스 제공자가 사전에 서비스 영역의 데이터베이스 구축을 위한 작업을 하거나 사용자 참여형으로 구축할 수 있으며 최근 SNS (Social Networking Service) 활성화 및 생활화에 힘입어 사용자 참여형이 적합한 방법으로 떠오르고 있다. 한 방안으로 스마트폰 사용자 C가 장소 D에서 SNS를 사용할 때 현재의 위치를 개념적인 공간 정보로 입력하게 함으로써 그 위치 정보와 수신되는 AP 정보를 함께 저장하게 되고 시간이 지남에 따라 자연스럽게 데이터베이스가 구축되는 방법이다. 이때 주의해야 하는 것은 “위치정보의 보호 및 이용 등에 관한 법률”을 위반하지 않아야 하므로 데이터베이스 구축에 활용되는 단말의 ID 정보를 함께 저장하지 말아야 한다 [3, 4].

그러나 정확도가 요구되는 응용분야에서는 개념적인 공간 정보 대신 정확한 좌표 정보를 요구할 수 있다. 이를 위해서는 RSSI 기반으로 추정된 거리정보를 활용하는 방법과 전자지문(fingerprinting) 방법을 사용할 수 있다. 먼저 거리정보 추정 및 이를 활용하는 방법을 알아본다. AP에서 송출된 신호는 다음과 같은 특성을 가지며 공간을 전파(propagation)한다 [5].

$$P(r_i) = P(r_0) - 10\alpha \log_{10} \frac{r_i}{r_0} \quad (1)$$

여기서 $P(r_i)$ 와 $P(r_0)$ 는 각각 AP로부터 거리 r_i 와 r_0 에서의 RSSI[dBm], 그리고 α 는 감쇄 인자를 나타낸다.

이 식을 사용하기 위해서는 $P(r_0)$ 와 α 는 미리 추정해서 사용해야 한다. 이 식을 통해 측정된 RSSI로부터 거리를 계산할 수 있다 [5]. 그리고 거리추정 정보를 사용하여 단말의 위치를 추정하는 경우 AP의 정확한 위치정보를 필요로 하므로 Cell-ID 기술에서 사용하는 방법과는 달리 정확한 AP 위치 데이터베이스를 사전에 구축하는 것이 필요하다. 그러나 대형 Mall을 응용 지역으로 하는 경우 사용자에 의해 임의로 설치된 AP의 정확한 위치를 좌표계 기반으로 구축하기가 쉽지 않다.

정확한 AP 위치 데이터베이스 구축 문제를 해결하기 위해 실내 좌표계 기반의 지도와 RSSI를 측정할 수 있는 S/W를 탑재한 단말을 응용 지역에서 사용하는 방법이 저자에 의해 제안되었다. 위치한 곳을 지도에 클릭하고 그 순간 각 AP로부터 전송된 신호를 수신하여 RSSI와 MAC 주소를 지도상의 위치정보와 함께 저장한 다음 삼변법(trilateration)으로 AP의 위치를 추정한다. 그림 1은 시험 결과를 나타낸다 [5]. 그림에서 점은 데이터 획득

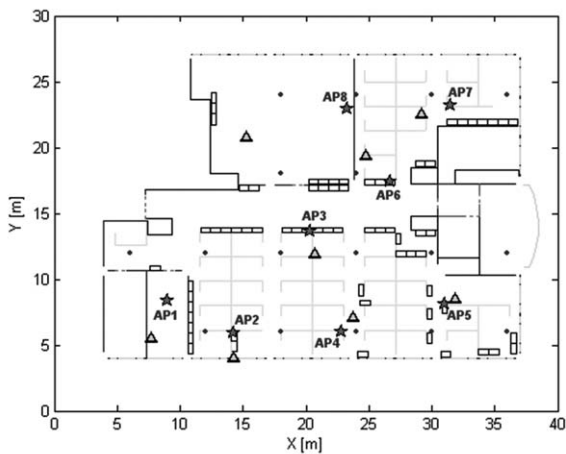
위치를 나타낸다. (a)는 획득 위치의 수가 17인 경우이며 (b)는 83인 경우이다. 별표는 정확한 AP의 위치이며 삼각형은 추정된 위치를 나타낸다. 이 시험 결과를 통해 데이터 획득의 위치가 많아질수록 평균적으로 정확한 AP의 위치가 추정되는 것을 알 수 있다. 그러나 응용 지역의 크기 및 인력과 시간을 고려하여 적절한 수의 데이터를 획득해야 한다.

그러나 단말에서 측정된 RSSI는 다중경로 및 장애물 투과 등에 의해 오차를 갖게 되고 또한 AP와 단말 사이의 거리에 의해 거리 추정오차가 발생하며 그림 2와 같은 특성을 갖는다.

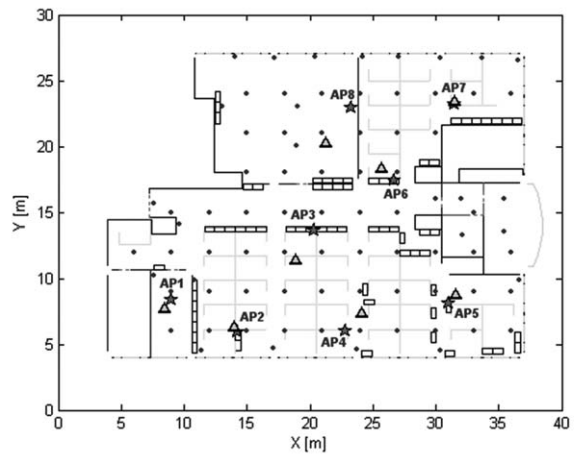
따라서 Wi-Fi의 RSSI를 사용하여 추정된 거리정보를 활용한 위치추정은 정확도 향상에 한계를 갖는다. 특히 AP로부터 먼 거리에서 추정된 거리정보를 사용하여 AP의 위치를 추정하는 경우 데이터베이스에 큰 오차를 포함시키게 되며 또한 이 데이

터베이스와 추정된 거리정보를 사용하여 단말의 위치를 추정하는 경우 큰 위치추정오차를 발생하게 되므로 정확한 위치추정에 응용하기에는 어려움이 있다.

Wi-Fi 기반으로 정확한 위치추정에 응용하기 위해서는 전자 지문 방법이 주로 이용된다. 사람마다 다른 지문이 있어서 획득된 지문을 데이터베이스와 비교검색 함으로써 해당 사람을 찾아낼 수 있듯이 응용 지역의 각 위치에서 수신되는 AP 정보의 조합은 위치마다 유일하므로 기 구축된 데이터베이스와의 비교검색을 통해 단말의 위치를 추정할 수 있다. 이 방법에서는 AP 데이터베이스는 필요하지 않으며 응용 지역 전반에 걸친 위치에 따른 수신 신호 정보를 데이터베이스화 해야 한다. 데이터베이스 구축에 어려움이 있으나 타 방법에 비해 정확한 위치를 추정할 수 있으므로 이 방법이 연구되고 있다. 연구분야로는 데



(a) 획득 위치의 수 = 17



(b) 획득 위치의 수 = 83

그림 1. AP 위치추정 시험 결과.

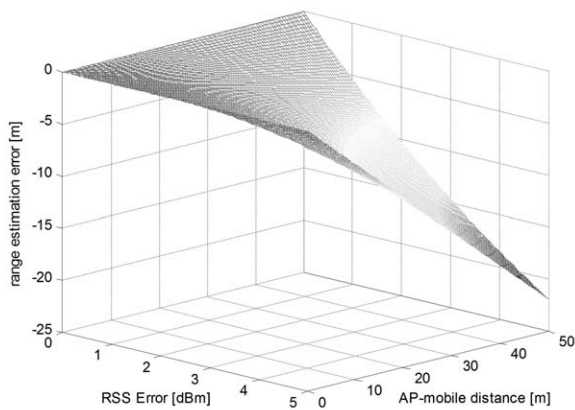


그림 2. RSSI 오차와 AP-단말간 거리에 따른 거리 추정 오차.

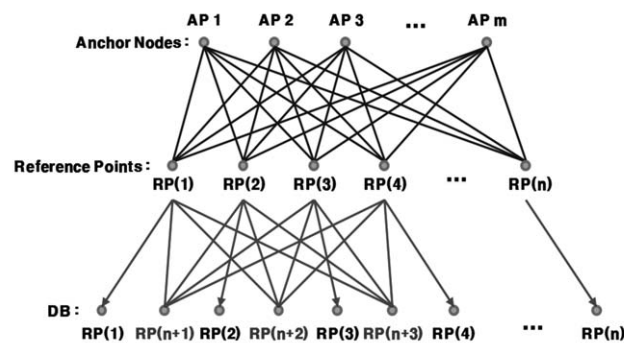
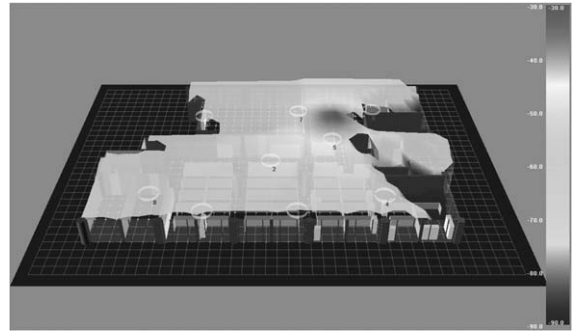


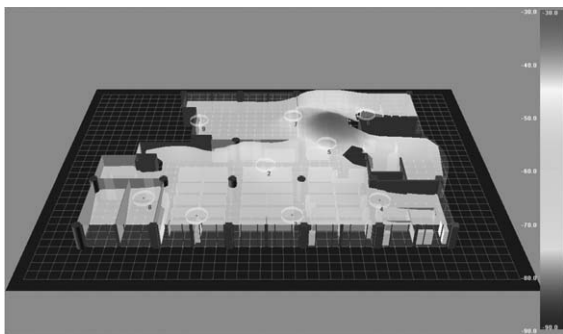
그림 3. 공간 보간법 기반 전자지문 DB 구축.



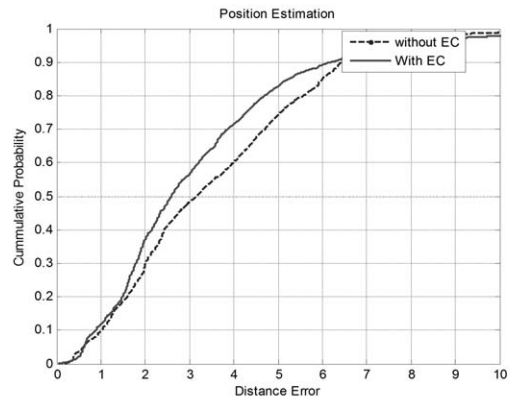
(a) 실내 응용 지역 지도



(b) 보상 전 추정된 RSSI



(c) 보상 후 추정된 RSSI



(d) 추정 RSSI 데이터를 사용한 위치추정 결과

그림 4. 시뮬레이션 기반 전자지문 DB 구축 시험 결과.

이터베이스 구축의 효율화 향상이 주를 이룬다. 즉 손쉽고 빠르게 데이터를 측정할 다음 보다 정확한 데이터베이스를 구축하고 이를 기반으로 단말의 정확한 위치를 추정하는 방법이 실 환경에서의 구축 시 반드시 필요하기 때문이다 [6-9].

그림 3은 공간 보간법 기반의 전자지문 데이터베이스 구축 방법을 나타낸 것이다. 즉 데이터 획득 위치(reference point) 간격을 넓게 하여 해당 위치에서 수신 신호 정보를 저장한 다음 전자지문 데이터베이스를 위한 위치 간격은 좁게 하여 측정된 수신 신호 정보와 위치와의 상관관계를 고려한 공간 보간법을 사용하여 데이터베이스를 새롭게 구축하는 방법이다. 공간 보간법에는 IDW (Inverse Distance Weighting), Kriging, Spline, 등의 방법이 있다.

한번 구축된 데이터베이스는 AP의 위치가 변경되거나 새로운 AP가 설치되는 경우 새롭게 갱신되어야 한다. 그러나 응용 지역이 넓은 경우 시간과 비용 투자가 크므로 어려움을 겪는다. 이 문제는 저자에 의해 개발된 시뮬레이션 기반의 전자지문 데이터베이스 구축 방법으로 해결할 수 있다 [8]. 그림 4는 이 방법의 원리 및 시험 결과를 나타낸 것이다. (a)는 실내 응용 지역 지도를 나타낸 것으로 이 방법의 구현을 위해 3D로 제작

된 것이다. 벽 및 가구 정보가 포함되며 기 설치된 AP의 위치 정보가 나타나 있다. 이 지도를 사용하여 각 AP로부터 송출된 신호가 응용 지역 각 위치로 전파되면서 발생하는 신호 감쇄 현상을 전파 전파(Ray Tracing) 방법으로 계산될 수 있지만 많은 계산시간을 요구하므로 간략화 된 다음과 같은 모델링으로 나타낼 수 있다 [8].

$$P(r_i) = P(r_0) - 10\alpha \log_{10} \frac{r_i}{r_0} - \sum_{i=1}^n \frac{\zeta(mat, th)}{\cos(d\theta)} - \delta P(r_i) \quad (2)$$

여기서 $\zeta(mat, th)$ 는 벽 투과시 발생하는 감쇄 특성으로 재질(mat)과 두께(th)로 결정되며 최종 신호감쇄는 신호의 입사각($d\theta$)에 영향을 받는다. 그리고 $\delta P(r_i)$ 는 다중경로에 의한 오차로 규정한다.

실내 지도가 있는 경우 $\sum_{i=1}^n \frac{\zeta(mat, th)}{\cos(d\theta)}$ 는 AP와 측정 위치 간의 LOS (Line-of-Sight)를 고려하여 계산될 수 있다. 이렇게 계산된 일 예는 그림 (b)에 나타내었다. 그러나 (2)에서 다중경로에 의한 오차는 계산으로 나타낼 수 없으므로 추정하기 위해 응용

지역의 약 20여 곳에서 데이터를 획득하여 이 오차를 추정 보상하며 방법은 거리에 따라 모델링 된 Kriging 기법을 사용한다. 이렇게 보상된 RSSI를 그림 (c)에 나타내었다. 벽 투과 시 다중경로 등의 의한 영향이 뚜렷하게 나타나는 것을 그림 (b)와 (c)를 비교함으로써 확인할 수 있다. 이렇게 시뮬레이션 기반으로 구축된 데이터베이스를 사용하여 위치 추정을 시험한 결과를 그림 (d)에 나타내었다. 이 결과 오차 보상 전 3.17m (CEP) 그리고 오차 보상 후 2.58m (CEP)가 되는 것을 확인할 수 있다. 즉 오차 보상의 효과를 확인할 수 있으며 오차 보상을 하지 않더라도 비교적 정확한 위치를 시뮬레이션 기반으로 구축된 전자지도 데이터베이스를 사용하여 추정할 수 있음을 보여준다. 이를 통해 효율적으로 전자지도 데이터베이스를 구축하고 이를 기반으로 위치추정에 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 이를 통해 위성항법 기술이 갖는 주요 요인 중 세 번째가 Wi-Fi 기반 실내 항법 기술에서도 만족됨을 알 수 있다.

결론적으로 Wi-Fi 기반으로 보행자의 위치를 추정하는 경우 다양한 방법으로 수행될 수 있으며 응용 분야에 따라 적절한 정확도와 비용 등을 고려하여 위치추정 방법 및 이에 필요한 데이터베이스를 구축하여 서비스할 수 있을 것으로 결론 내릴 수 있다.

2. IEEE 802.15.4a 기반 IR-UWB/CSS를 활용한 보행자 항법 기술

Wi-Fi의 RSSI 정보를 사용해서는 정확한 거리정보를 측정할 수 없으며 이로 인해 정확한 위치추정은 어려운 것으로 알려져 있다. 그러나 응용 분야에 따라 보다 정확한 위치추정을 필요로 할 수 있으며 Wi-Fi와 같이 고정된 AP가 없는 경우 모바일 단말의 위치를 추정해야 하는 응용에 사용할 수 있는 타 PHY 기반의 연구가 이루어지고 있다.

무선통신 기반으로 정확한 거리를 추정할 수 있는 PHY에는 IEEE 802.15.4a 기반 IR-UWB와 CSS가 있다. 특히 IR-UWB는 넓은 대역폭 사용으로 인해 정확한 거리를 추정할 수 있는 것으로 알려져 있다. IR-UWB의 특성은 다음과 같다 [10-12].

- 대역폭 > 500Mhz 또는 비대역폭(fractional bandwidth) > 20%
- 시간 도메인에서 수 nsec 펄스로 인해 시간 분해능 우수: 약 30cm
- 다중경로 및 간섭에 강인한 특성을 가짐
- 저전력 및 탐지의 어려움
- 낮은 송출 파워: FCC 규정 파워 < 41.3 dBm/MHz

이렇게 나타낸 IR-UWB의 특성에 의해 정확한 LOS를 전파 경

로를 갖는 First Arrival Peak을 찾는 경우 30cm이내의 오차를 갖는 정확한 거리를 추정할 수 있다. 특히 TWR (Two Way Ranging) 또는 SDS-TWR (Symmetric Double Sided-TWR) 기법에 의해 비동기 방식으로 단말 간의 거리를 측정할 수 있으므로 추가적인 시각동기 장치의 설치를 필요로 하지 않는다. 그러나 낮은 송출 파워로 인해 신호의 도달 거리가 약 30m 정도로 짧다.

이런 특성은 CSS에서도 유사하게 나타난다. CSS는 2.4GHz 대역을 사용하며 그림 5와 같은 신호의 형태를 갖는다 [12].

CSS 기반 거리추정에서 LOS가 보장되는 경우 30cm 이내의 정확도로 거리추정이 가능하며 신호의 전파 도달 거리 또한 약 30m로 IR-UWB와 유사하다. 그러나 현재 IEEE 802.15.4a 표준 기반 IR-UWB는 전세계적으로 칩을 구할 수 없으므로 CSS를 대용으로 위치추정 기술을 개발하고 있다. 같은 표준을 사용하므로 MAC이 동일하기 때문에 PHY 교체만으로 쉽게 IR-UWB 기반 시스템으로 전환이 가능하다. CSS 기반으로 위치추정 시스템을 구축하는 경우 기 구축된 인프라가 없으므로 고정 인프라 없는 환경에서 단말들의 위치를 추정할 수 있는 기술이 필요하다. 이를 위해 P2P (Peer-to-Peer) 거리추정 및 위치추정 기술의 연구 개발이 이루어지고 있다. 현재 저자에 의해 개발된 기술은 그림 6

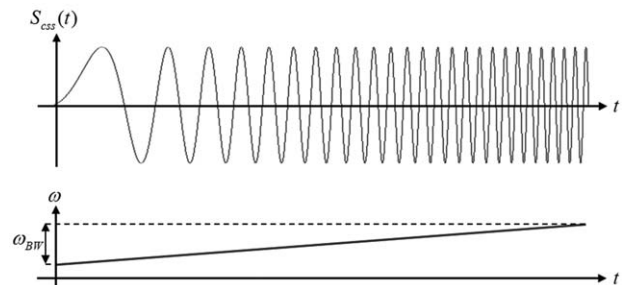
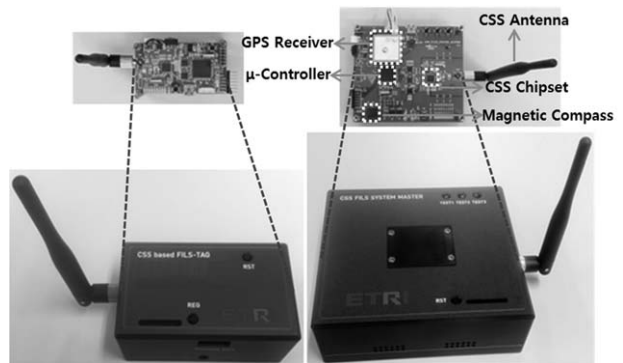


그림 5. 시간영역 칩 신호 형태.



(a) 모바일 단말

(b) 마스터 단말

그림 6. CSS 기반 P2P 위치추정 시스템.

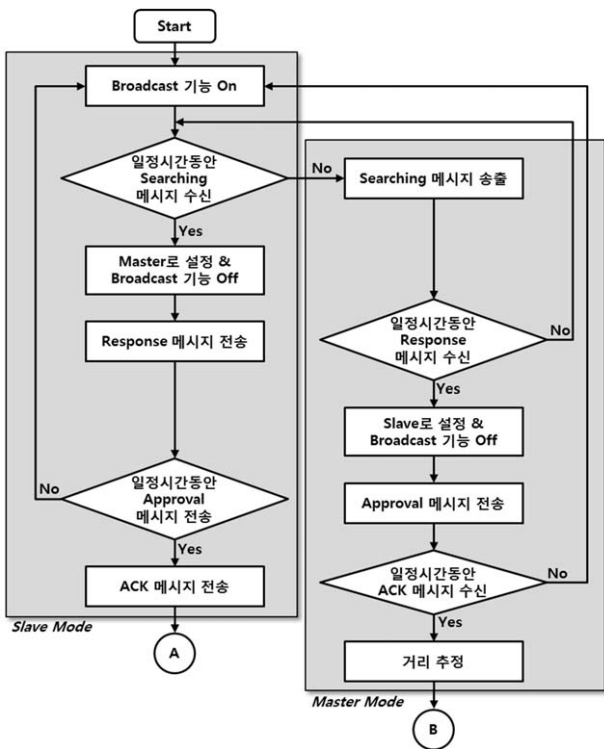
에서 보여지는 시스템과 P2P 거리추정 알고리즘 및 적응적 (adaptive) 위치추정 알고리즘 등이 있다 [12].

시스템은 크게 모바일 단말과 마스터 단말로 구성되며 모바일 단말은 위치추정 대상이 되는 보행자가 소지하는 단말이며 마스터 단말은 모바일 단말의 위치를 추정하는 단말이 된다. 추정된 위치는 마스터 단말에 연결된 출력장치에 display할 수 있다. P2P 거리추정 알고리즘은 각 모바일 단말이 자신을 중심으로 연결 가능 영역 내에 위치한 타 모바일 단말과의 주기적인 연결을 통해 거리를 측정하고 획득된 연결 정보를 서로 공유 또는 전송하는 알고리즘으로 구성되며 그림 7과 같은 흐름도를 갖는다.

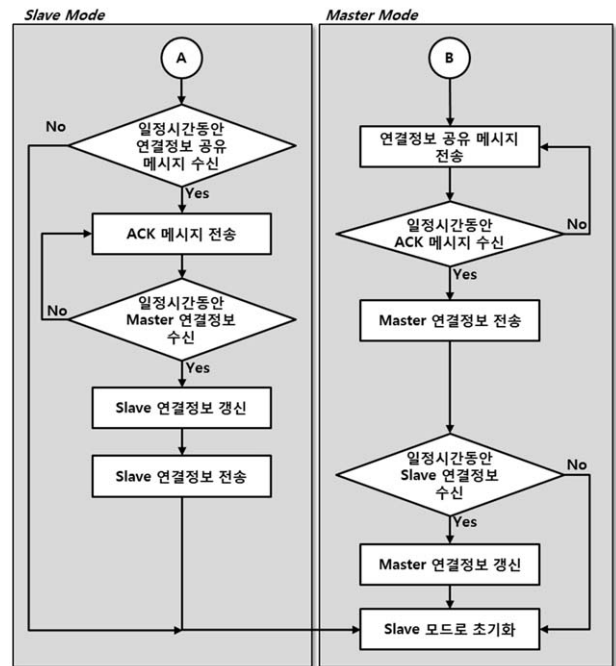
자신을 중심으로 타 단말을 연결한 경우 자신을 Master 모드로 설정하고 타 단말은 Slave 모드로 설정한 다음 그림 7에서 나타난 순서대로 메시지를 송수신하며 거리를 추정하고 연결정보를 서로 공유한다. 이와 같은 과정을 주기적으로 수행하고 각 단말이 Master 모드와 Slave 모드를 상황에 맞게 교차 설정함으로써 시간에 따라 모든 연결정보를 서로 공유하게 된다. 이 정보는 마스터 단말과 해당 연결 영역 안에 위치한 모바일 단말과의 연결을 통해 마스터 단말에서 획득할 수 있다. 마스터 단말

에서는 이 연결정보를 사용하여 자신을 중심으로 한 지역 동체 좌표계 상에 위치한 모바일 단말의 위치를 추정하게 된다. 고정된 인프라가 없는 환경에서 방향성 제약조건을 부여하기 위해 ID가 0인 모바일 단말을 특정 위치(마스터 단말의 오른쪽 옆 임의의 위치)에 둬으로써 해결할 수 있다.

단말의 위치는 마스터 단말에서 가까운 모바일 단말부터 먼 곳에 있는 단말까지 순차적으로 추정한다. 순서 원리는 각 모바일 단말에 연결된 RN (Reference Node)의 수가 많은 단말부터 선택한다. RN은 위치가 먼저 추정된 모바일 단말과 마스터 단말이 된다. 이를 위해 우선 마스터 단말은 위치를 (0.001m, 0.001m)로 설정하고 ID가 0인 모바일 단말은 마스터 단말과의 연결을 통해 측정된 거리정보를 사용하여 위치를 (\tilde{r}_{m-0} , 0.001m)로 설정한다. 연결된 RN의 수가 3개 이상이면 ILS (Iterative Least Squares), DS (Direct Solution) 등의 방법을 사용하여 위치를 추정하며 연결정보의 수가 2개인 경우 DS 방법을 사용한 다음 연결정보를 활용하여 적응적으로 두 후보 해 중에서 하나를 선택한다 [10]. ILS 방법을 사용하는 경우 초기 추정치 설정에 따라 지역최소(local minimum) 문제가 발생할 수 있다. ILS 방법은 측정치와 추정치의 차의 제곱이 최소가 되는 위치를 추정하는 방법



(a) P2P 거리추정



(b) 연결정보 공유

그림 7. P2P 거리추정 알고리즘.

으로 그림 8은 응용 영역 내에서 계산된 측정치와 추정치 차의 제곱을 나타낸 것이다. RN의 위치에 따라 그림에서 볼 수 있듯이 전역최소해와 지역최소해가 유사한 오차를 갖는 경우가 발

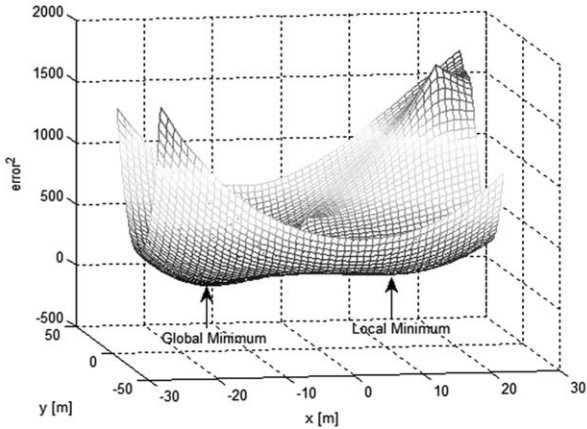
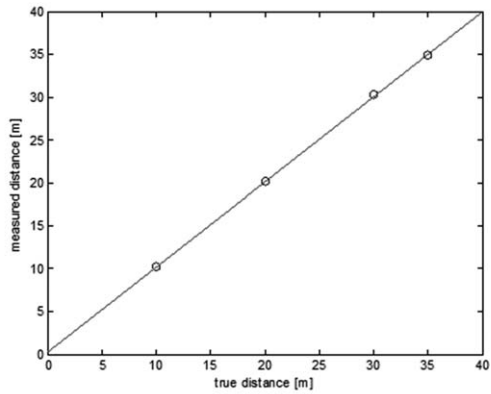


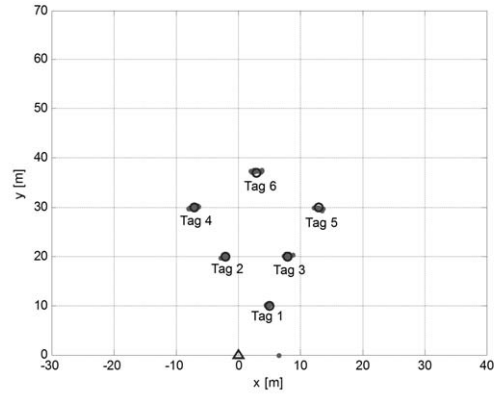
그림 8. 지역최소 문제가 발생 가능한 현상.

생할 수 있다. 이런 경우 초기 추정치에 따라 잘못된 해를 계산하게 된다. 이 문제는 연결정보를 사용하여 초기 추정치의 후보를 두고 후보 추정치를 변경하면서 최소의 오차가 나는 해를 선정함으로써 해결할 수 있다[13].

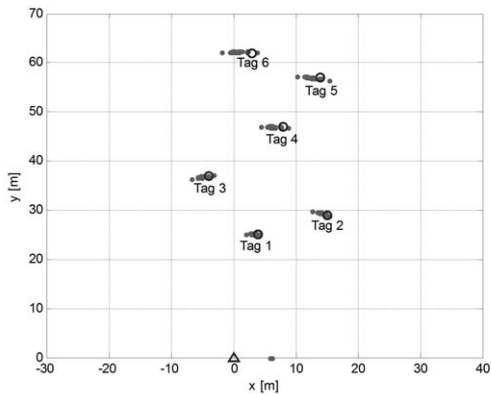
개발된 알고리즘을 탑재한 시스템을 사용한 시험 결과는 그림 9와 같다 [12]. (a)는 거리추정 결과로 30m 이내의 거리에서 총 40번의 시험을 수행한 결과 평균 0.149m, 표준편차 0.179m의 오차를 나타내며 우수한 거리추정 결과를 보인다. (b)~(d)의 상황을 설정한 경우 위치추정 결과 6개의 모바일 단말의 위치추정 순서에 따라 평균 오차가 각각 0.630m, 0.716m, 0.853m, 1.266m, 1.313m, 1.863m가 나오는 것을 볼 수 있으며 추정 순서에 따라 오차가 커지는 이유는 RN로 사용되는 기 추정된 모바일 단말의 위치추정 오차가 다음 모바일 단말 위치추정에 영향을 미치기 때문이다. 그러나 위치추정 정확도가 다수의 보행자들에게 정확한 항법정보 및 응용 서비스를 제공할 수 있는 수준임을 확인할 수 있다.



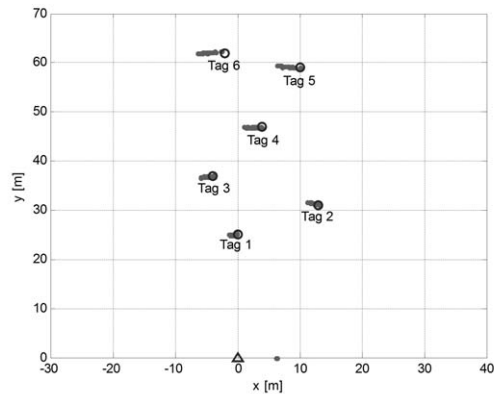
(a) 거리추정 결과



(b) 위치추정 결과 I



(c) 위치추정 결과 II



(d) 위치추정 결과 III

그림 9. P2P 거리추정 기반 위치추정 정확도 시험.

결론적으로 IR-UWB 또는 CSS를 활용하는 경우 정확한 거리 추정 특성에 의해 P2P 거리추정 및 위치추정 알고리즘을 사용함으로써 다수의 모바일 단말의 위치를 정확하게 추정할 수 있음을 알 수 있다. 해당 기술은 인프라가 없는 영역에서 활동하는 보병/소방관 등의 효율적인 작전 수행을 위한 ID 및 위치추정 기술로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

3. 기타 보행자 항법 기술 및 응용 분야

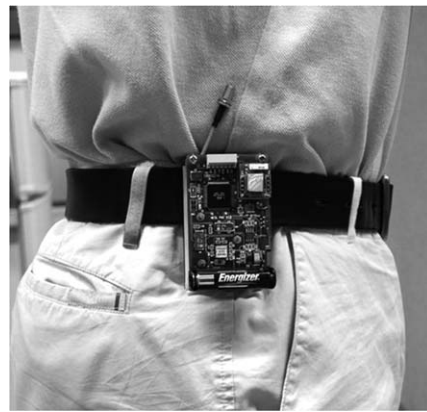
무선통신 기반 항법 기술은 인프라에 의존적 이거나 상호연동을 통한 기술이 수반되어야 한다. 그러나 보행자 몸에 장착된 센서 기반으로 항법을 수행하는 경우 이런 제약조건 없이 독립적으로 항법을 수행할 수 있으며 이 기술을 PDR이라고 한다. 이전에는 그림 10과 같이 센서모듈을 개발하여 신발, 허리

및 다양한 신체 부위에 장착을 하고 이를 기반으로 한 항법 기술을 개발하였지만 최근에는 스마트폰에 다양한 센서들이 탑재됨에 따라 스마트폰 기반의 항법 기술 개발이 주를 이루고 있다[14-17].

스마트폰에는 입력장치의 수단으로 가속도계 및 자이로 등과 같은 센서를 내장하고 있다. 이 센서들의 출력은 보행자의 보행 특성을 포함하고 있으므로 센서 신호처리를 통해 걸음 검출 및 보폭 추정을 수행할 수 있다. 이 정보의 적분은 보행자의 이동 거리를 나타낸다. 항법을 수행하기 위해서는 이 정보가 이동 방향과 결합해야 한다. 스마트폰에는 지자기 센서가 내장되어 있으며 이 센서의 출력을 사용하여 이동 방향을 계산할 수 있다. 그러나 이를 위해서는 스마트폰을 특정 방향으로 몸에 고정시키는 것이 필요하다. 그러나 보행자에게 이런 제약조



(a) 신발에 장착한 센서모듈



(b) 허리에 장착한 센서모듈



(c) 등에 장착한 센서 모듈



(d) 스마트폰 기반

그림 10. 보행자 항법의 연구 예.

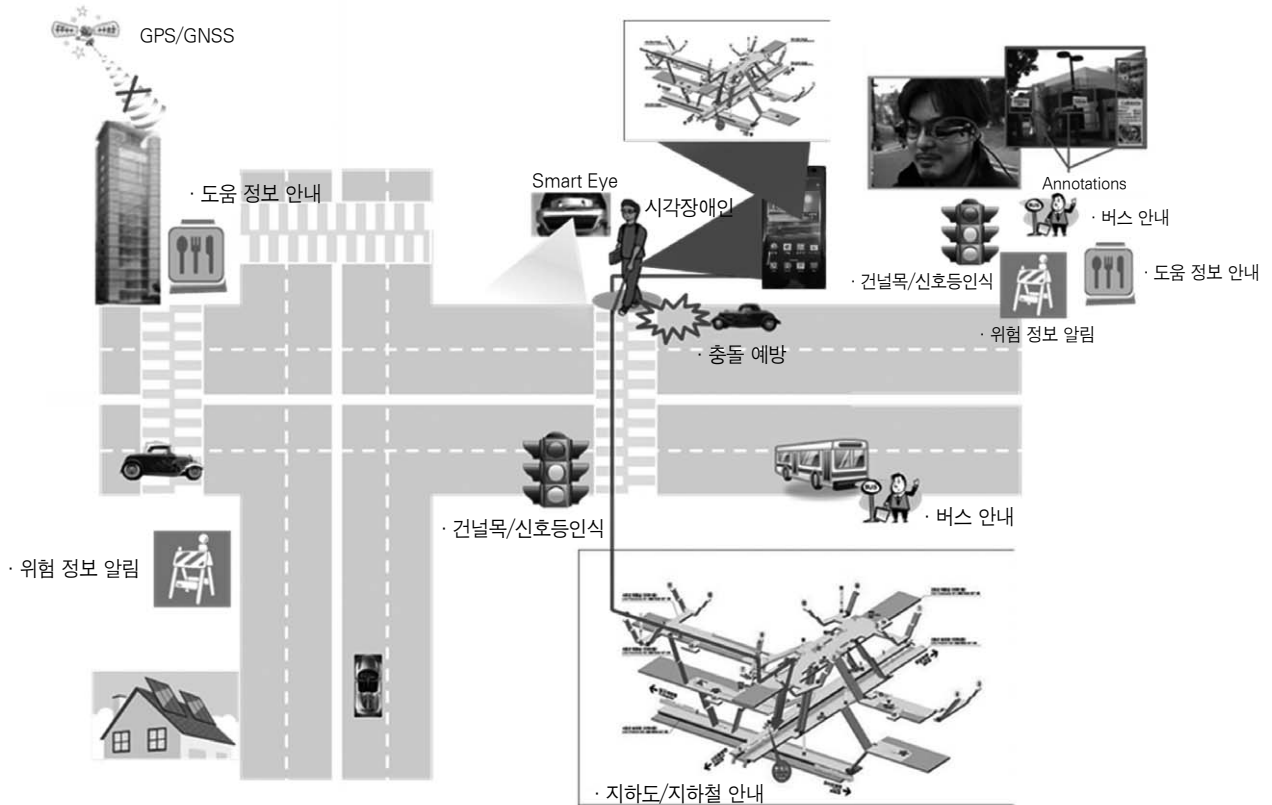


그림 11. 보행자 항법의 응용 분야 예.

건을 부과해서는 실 응용이 불가능해 진다. 따라서 항법을 수행하는 응용은 이런 제약조건을 수용할 수 있는 분야에서 사용할 수 있다.

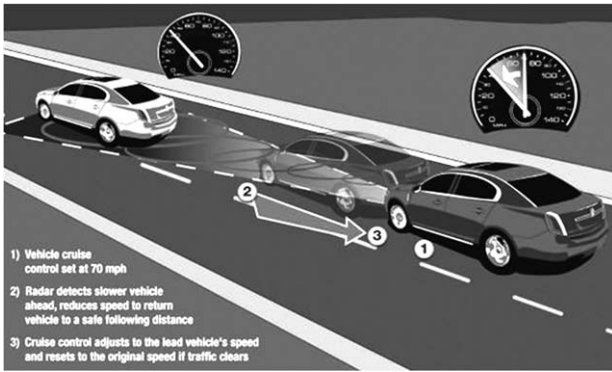
스마트폰에 내장된 센서 기반으로 이동거리 및 위치를 추정하는 경우 처음에는 정확한 해를 제공하지만 시간에 따라 오차가 크게 증가하게 된다. 이런 문제를 해결하기 위해 실외에서는 위성항법, 실내에서는 무선통신 기반 위치추정 기술과 융합함으로써 정확하고 연속적인 해를 제공할 수 있게 된다. 인프라 상황에 따른 적응적인 융합 필터가 개발되고 있다 [17]. 또 하나의 연구 방향은 일반인의 스마트폰이 보행 시 호주머니, 손, 가방 등에 위치할 수 있으며 이 경우 위치를 자동적으로 파악하여 항법 또는 입력장치로 사용될 수 있다. 따라서 최근에는 스마트폰에 내장된 센서의 신호처리를 통해 스마트폰의 신체 내 위치를 추정하는 연구도 이루어지고 있다 [18].

보행자 항법은 LBS, SNS 등을 위해 다양하게 사용되고 있으며 정확성/연속성/신뢰성 등이 보장되는 경우 그림 11과 같이 시각장애인을 위한 안전보행지원 기술로 활용될 수 있을 것이다. 이를 위해 센서/통신/위성 및 P2P Interaction 기술 등을 통해

정확하고 연속적인 위치를 추정할 수 있으며 영상 기반으로 도움 정보 및 위험 정보를 추출하고 위치정보와 융합함으로써 신뢰성 있고 편리한 안전보행을 지원하는 기술로 사용될 수 있을 것이다. 해당 기술의 요소기술은 기 개발되고 있으나 통합된 서비스 기술은 아직 없는 상황이며 향후 개인 보행자 항법 기반의 보행 지원 기술 및 사회안전망 연동을 통해 장애 유무에 관계없이 안전한 보행 및 사고 예방을 할 수 있는 수준으로 개발될 것으로 전망된다.

Ⅲ. 차량 항법 기술

차량 항법은 편의성과 안전성을 운전자에게 지원하기 위해 필요한 기술로 위성항법 기반의 항법장치를 주로 사용하며 위치기반 다양한 콘텐츠를 포함하는 전자지도와 연계하여 길안내 및 안전주의정보를 제공하고 있다. 그러나 오늘날 다양한 서비스의 요구에 의해 ACC (Adaptive Cruise Control), 자동 발렛 킥, 무인 운전, AR (Augmented Reality) 기반 항법정보 HUD (Head Up Display), 등의 기술이 개발되고 있으며 이를 위해서는 위성



(a) ACC



(b) Google 무인 자동차



(c) 한양대학교 A1 자율주행자동차



(d) AR 기반 HUD

그림 12. 무인 운전 차량 예.

항법 만으로는 적합한 서비스를 제공할 수 없게 되었다 (그림 12). 차량의 연속적이고 정확한 항법 정보를 추정하기 위해 DR 또는 INS와 GPS를 결합한 복합항법 기술이 사용될 수 있으며 추가적으로 영상정보, V2V (Vehicle-to-Vehicle), V2I (Vehicle-to-Infra) 등을 통한 복합항법 및 협력형(cooperative) 항법기술 등이 연구되고 있다.

차량 항법 기술은 복합 항법 센서에 따라 다양하게 개발될 수 있으며 기본적으로 센서 융합 필터를 사용하여 융합된 차량의 항법정보를 추정한다. 이때 사용되는 필터의 특성에 따라 항법 시스템의 성능이 좌우되기도 한다. 본 장에서는 필터의 연구 현황에 대하여 기술하고자 한다. 그림 13은 융합 필터 기술 개발 동향을 개발 흐름에 따라 나타낸 것이다. 선형 시스템의 상태변수 추정에 일반적으로 칼만 필터가 사용된다. 이 칼만 필터를 기준으로 다양한 방향으로 연구가 진행되고 있으며 오른쪽 박스부분에 위치한 필터들은 본 저자에 의해 연구 개발된 필터들로 본 장에서 소개하고자 한다. 개발된 필터들은 일반 시스템 상태변수 추정에 적용할 수 있지만 개발될 당시 차량용 복합항

법용 필터를 위해 개발된 것이다.

먼저 항법시스템과 같이 비선형 시스템의 융합 및 상태변수 추정에 적용하기 위해 확장칼만필터(EKF: Extended Kalman Filter)가 개발되었다 [19]. 상태변수 초기 추정치를 선형화 기준점으로 하여 비선형 함수를 선형화 한다. 선형화 기준점에 대한 오차를 상태변수로 설정한 다음 칼만필터를 사용하여 오차를 추정한다. 추정된 오차를 사용하여 선형화 기준점을 갱신한다. 이 과정을 반복한다. 필터에서 가장 중요한 특성 중의 하나가 가관측성(observability)이다. 시스템이 가관측한 경우 EKF는 시간에 따라 상태변수 추정치가 점점 0 근처로 수렴하게 된다. 그러나 EKF에서 초기 선형화 기준점 오차가 큰 경우 시스템이 가관측함에도 불구하고 EKF는 큰 오차를 유발하거나 발산하기도 한다 [20]. 이 문제를 해결하기 위해 개발된 필터가 무향칼만필터(UKF: Unscented Kalman Filter)이다 [21].

그림 14에서 EKF와 UKF의 개념을 비교하여 나타내었다. 필터에서 추정 파라미터의 특성은 평균(\hat{x})과 공분산(P)으로 표현하며 EKF에서는 이 두 값을 사용하여 상태변수를 추정한다.

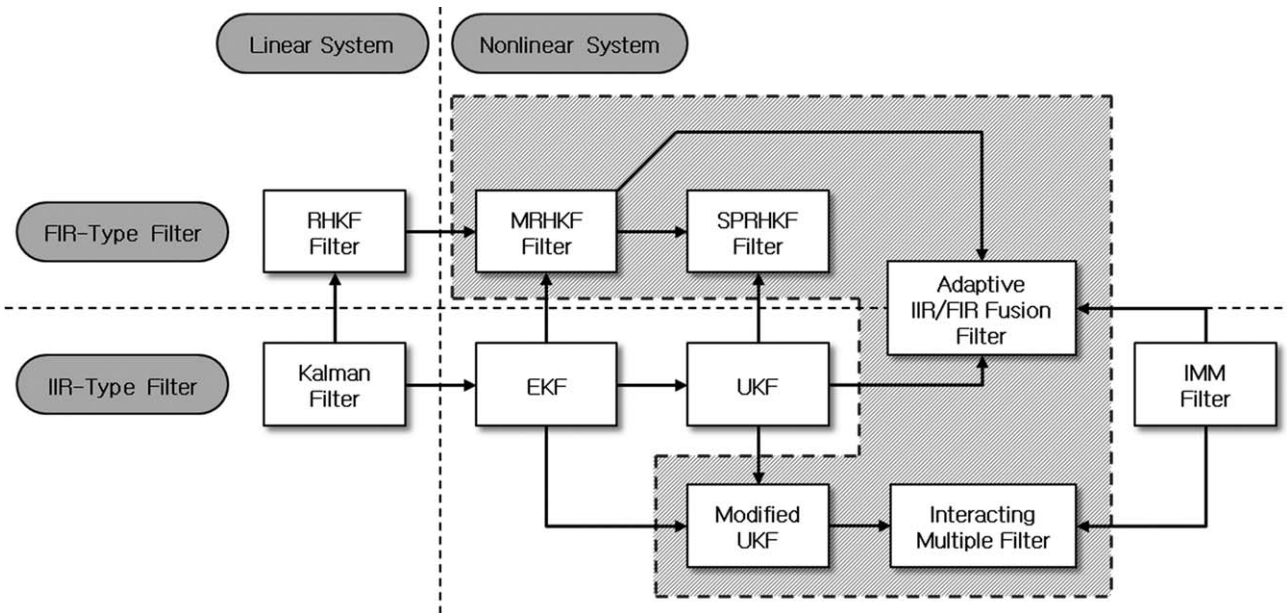


그림 13. 필터 기술 개발 동향.

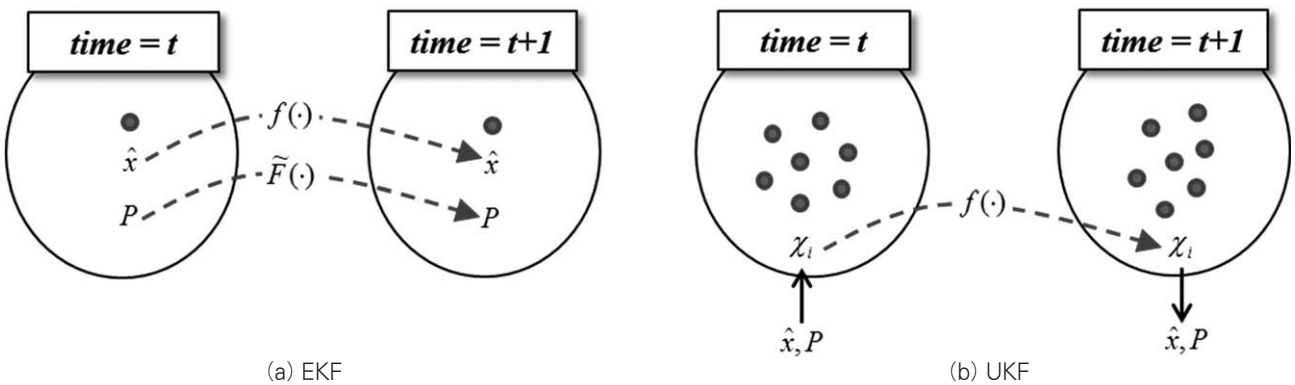


그림 14. EKF와 UKF의 개념 비교.

EKF에서는 상태변수의 평균은 비선형 함수($f(\cdot)$)를 통해 시간 전파(time propagation)하고 공분산 행렬은 비선형 함수를 선형화하여 계산한 자코비안(Jacobian) 행렬($\tilde{F}(\cdot)$)을 사용하여 시간전파 한다. 이 과정에서 큰 초기 상태변수 추정 오차가 존재하는 경우 자코비안 행렬에 큰 오차가 포함되어 공분산 행렬 계산에 문제가 발생하게 되며 결국 필터의 불안정성이 야기된다. 반면 UKF에서는 상태변수의 평균과 공분산 특성을 반영하는 시그마 포인트(χ_i)를 설정한다. 그리고 시그마 포인트를 직접 비선형 함수를 통해 시간전파 한 다음 시간 전파된 시그마 포인트를 직접 사용하여 상태변수의 평균과 공분산을 계산한다. 즉 오차를 포함하는 자코비안 행렬을 사용하지 않으므로 초기 상태변

수 추정 오차에 EKF보다 강인한 특성을 갖는다[21].

최근에는 INS와 GPS를 결합한 복합항법필터에 EKF 대신 UKF를 사용하는 응용이 늘어가고 있다. 그러나 INS는 50Hz 이상의 고속 갱신 주파수를 갖고 GPS는 1Hz와 같은 저속 갱신 주파수를 갖는 다중 속도를 갖는 센서를 결합하는 시스템에서 UKF는 EKF 대비 큰 계산량을 갖는 단점을 갖는다. 이런 문제를 해결하기 위해 MUKF (Modified UKF)가 연구되었다 [22]. 그림 14와 비교하여 MUKF의 개념을 그림 15에 나타내었다. MUKF는 EKF와 UKF를 결합한 구조를 갖는다. 즉 상태변수의 평균은 EKF와 같이 INS 시간전파하고 공분산은 GPS 측정치 갱신 주기로 시그마 포인트를 비선형 함수를 통해 바로 시간전파 한 다음

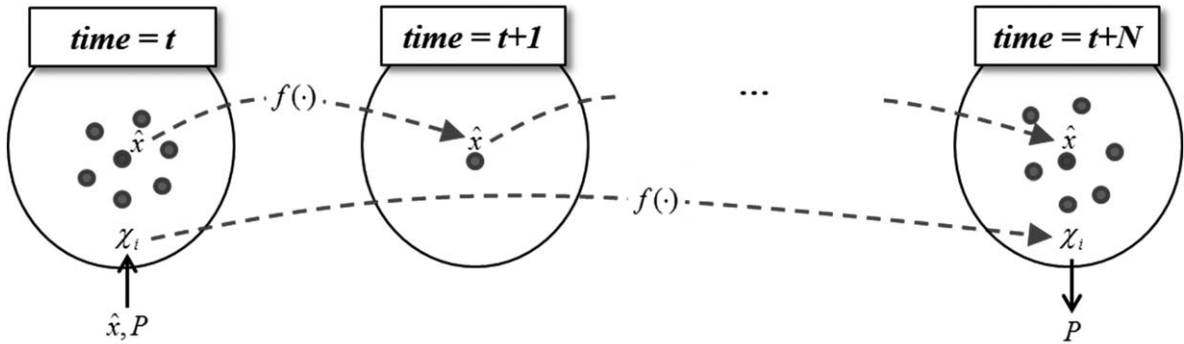


그림 15. MUKF의 개념.

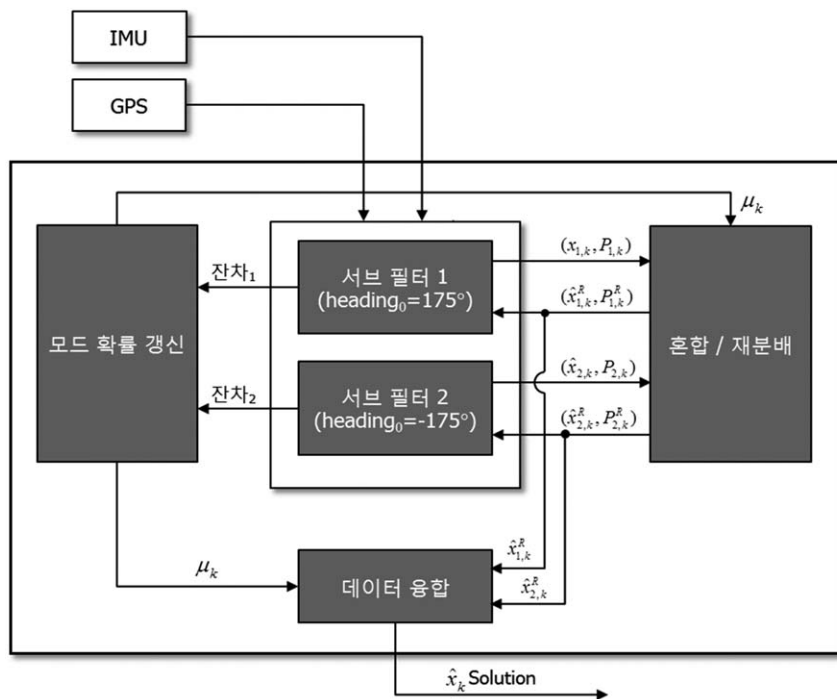


그림 16. 상호작용 다중 필터의 구조.

계산한다. 시그마 포인트의 시간전파를 측정치 갱신 주기로 수행함으로써 계산량은 EKF 수준으로 낮출 수 있다. 또한 공분산 행렬의 시간전파에서 시그마 포인트를 사용하는 구조를 가지므로 큰 초기 상태변수 추정 오차에 EKF 보다 강인한 특성을 UKF와 동일하게 갖는다. INS/GPS 복합항법 필터의 경우 큰 초기 방위각 추정 오차에 강인한 특성을 갖는다.

그러나 초기 방위각 추정 오차의 허용 범위가 EKF 보다는 넓지만 $\pm 180^\circ$ 까지 허용하지는 못한다. 이런 문제를 해결하기 위해 IMM (Interacting Multiple Model) 필터 구조의 상호작용 다중 필터가 연구되었다. 기존의 IMM 필터는 tracking 분야에서 target

의 동적 모델을 알 수 없으므로 다중 모델을 융합하여 target의 위치를 추정하는데 사용되었다. 본 연구에서는 상태변수의 초기 상태변수 추정치가 다른 동일한 모델의 두 필터를 융합하여 초기 상태변수 추정 오차에 강인한 해를 제공하는데 그 목적을 둔다 [23]. 그림 16에 필터의 구조를 나타내었다. 각 서브 필터의 잔차(residual)를 사용하여 모드 확률(mode probability)을 갱신하고 이를 기반으로 두 서브 필터의 상태변수와 공분산을 혼합/재분배한다. 그 다음 재분배된 상태변수를 모드 확률을 사용하여 융합함으로써 최종 해를 생산한다. 이렇게 구성된 필터는 INS/GPS 복합항법시스템에서 초기 방위각 추정 오차를 $\pm 180^\circ$

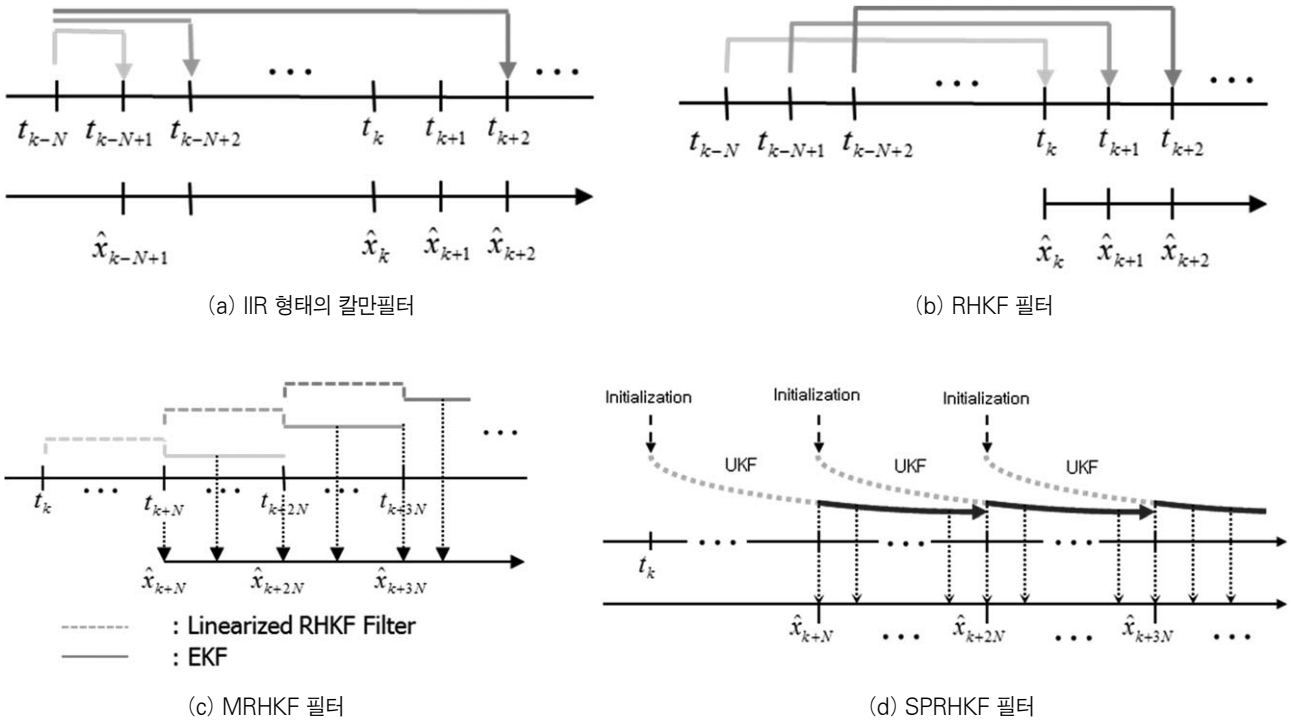


그림 17. 필터의 개념 비교.

까지 허용한다.

칼만필터의 또 다른 방향으로의 연구로 FIR 필터가 있다. 기존의 칼만필터는 모두 IIR 구조를 갖고 있으며 장점은 시스템 모델에 오차가 없으며 완전 가관측하고 공정잡음(process noise) 및 측정잡음(measurement noise)이 백색잡음만으로 이루어진 경우 측정치 갱신(measurement update)을 함에 따라 오차 공분산이 점점 0 근처로 작아지며 동시에 추정오차 또한 0으로 수렴하게 된다. 그러나 이런 조건이 만족되지 않는 경우 필터의 안정성은 유지할 수 없게 된다. 반면 FIR 필터는 모델링 오차나 일시적인 측정치 고장 등에 강인한 특성을 갖는다. 특히 MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 센서 사용으로 인해 정확한 센서 오차 모델링이 어려운 경우나 센서의 불특정 고장 등이 발생하는 경우 유용하게 활용될 수 있다. 선형 시스템에 적용할 수 있는 FIR 필터로 RHKF (Receding Horizon Kalman FIR) 필터 및 이와 유사한 필터들이 개발되었다 [24]. 그러나 이 필터는 비선형 시스템에 사용할 수 없으며 계산량이 많고 한정된 수의 측정치만을 사용함에 따라 수렴특성이 나쁜 단점을 갖고 있다. 이 문제를 해결하기 위해 MRHKF (Modified RHKF) 필터가 개발되었다 [25]. 이 필터는 선형화된 RHKF 필터와 EKF를 결합하여 비선형 시스템에 적용할 수 있도록 하였으며 구간의 후퇴 간격(receding

interval)을 시스템 차수만큼 하여 계산량을 크게 감소시켰다. 또한 EKF를 사용하는 구간 동안 되먹임(Feedback) 구조를 가짐으로 인해 필터의 수렴특성을 향상시켰으며 추정치가 불연속적으로 들어오는 경우에도 필터의 안정성을 유지시켜주는 기능을 갖고 있다. 그림 17에 IIR 형태의 칼만필터와 RHKF 필터, 그리고 MRHKF 필터의 구조를 각각 나타내었다.

MRHKF 필터의 단점은 각 구간의 초기 상태변수 추정값의 오차가 작아야 한다. 이 문제는 UKF의 장점을 결합함으로써 해결할 수 있다. 이렇게 연구된 필터가 SPRHKF (Sigma Point based RHKF) 필터이다 [26]. SPRHKF 필터의 개념은 그림 17 (d)에 나타내었다. 이 필터는 UKF만으로 MRHKF 필터를 구성한 것으로 그림에서 점선은 숨김(hidden) 구간으로 해를 제공하지 않으며 실선이 활동(active) 구간으로 해를 제공하는 것으로 구성되어 있다. 숨김 구간의 초기에서 발생하는 오차는 UKF의 장점으로 인해 필터의 안정성을 유지하며 가관측한 경우 숨김 구간의 끝에는 공분산의 크기가 줄어든 상황이 되므로 활동 구간에서는 오차가 작은 해를 제공할 수 있게 된다. 그러나 전체 구조는 FIR 구조를 가지므로 모델링 오차 및 일시적인 센서의 고장에 강인한 특성을 갖는다.

MRHKF 필터와 SPRHKF 필터는 기존 FIR 필터의 나쁜 수렴

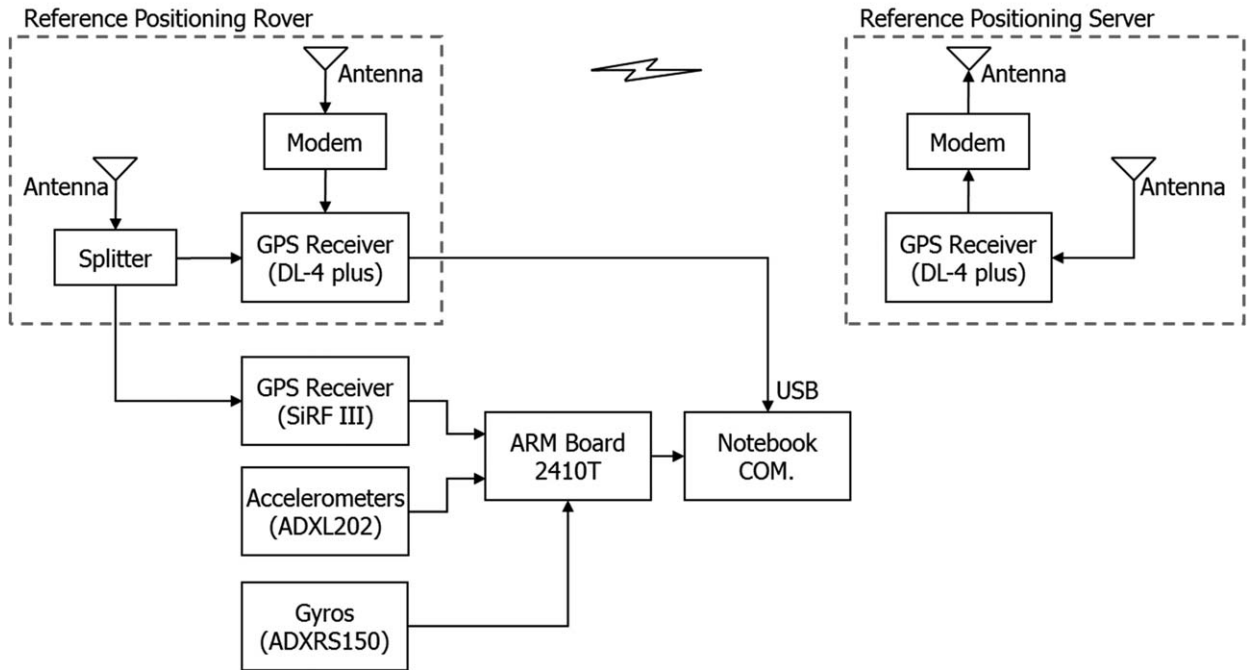


그림 18. 시험 시스템 구조.

특성을 개선한 결과를 갖지만 IIR 필터만큼 수렴특성이 향상되지는 않는다. 즉 IIR 필터와 FIR 필터는 각각의 장점과 단점을 그대로 갖고 있으며 이 두 필터에서는 FIR 필터의 단점의 크기를 낮추는 것으로 접근한 필터이다. IIR 필터의 장점과 FIR 필터의 장점만을 결합한 필터를 위한 연구가 이루어졌으며 적응형 IIR/FIR 융합 필터가 발표되었다 [27]. 이 필터는 상호작용 다중 필터에서와 같이 IMM 필터의 구조를 가지며 서로 다른 특성을 갖는 두 필터인 IIR 형태의 UKF와 FIR 형태의 MRHKF 필터를 융합하여 IIR 필터의 장점과 FIR 필터의 장점만을 갖는다. 즉 모델링 오차와 일시적인 측정치 고장에 강인하며 수렴특성 또한 좋은 결과를 갖는다. 또한 스무딩 특성을 갖는 해를 실시간으로 제공한다. 성능 검증을 위해 INS/GPS 복합항법시스템을 그림 18과 같이 구성하였다. 그리고 가속도계와 자이로에 다음과 같은 임의의 랜덤워크 오차를 추가하였다.

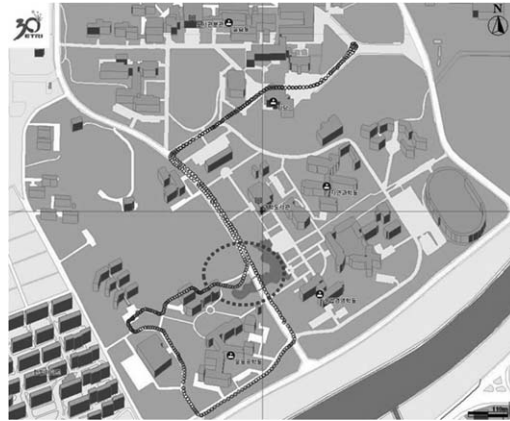
$$\begin{aligned}
 \tilde{f}_y^b(t) &= f_y^b(t) + n_a(t), \\
 n_a(t) &= n_a(t-1) + w_a(t), \quad w_a(t) \sim N(0, (10mg)^2) \\
 \tilde{\omega}_{ib_z}^b(t) &= \omega_{ib_z}^b(t) + n_g(t), \\
 n_g(t) &= n_g(t-1) + w_g(t), \quad w_g(t) \sim N(0, (0.1^\circ/s)^2)
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

여기서 f_y^b 와 $\omega_{ib_z}^b$ 는 각각 y축 가속도계와 z축 자이로 출력이다.

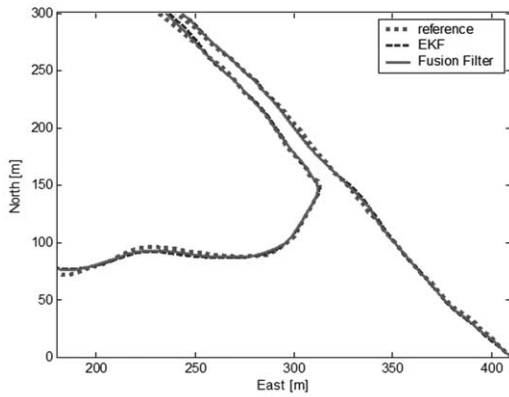
필터는 해당 오차 모델링에 오차를 가지며 랜덤상수로 설계하였다. 랜덤워크 오차 추가 전후의 필터 결과는 그림 19와 같다. 운항 궤적을 한 바퀴 운항하면서 Reference 시스템으로 궤적을 저장하고 시각동기 된 관성센서와 GPS 수신기의 Raw 데이터를 저장한 다음 후처리 결과를 그림 19(b), (c)에 나타내었다.

랜덤워크 오차를 추가하기 전에는 EKF와 융합 필터의 결과는 거의 동일한 것을 볼 수 있다. 그러나 랜덤워크 오차를 추가하는 경우 EKF의 결과는 GPS 측정치가 좋은 환경에서도 큰 오차가 발생하는 것을 볼 수 있다. 그러나 융합 필터는 이런 상황에서도 좋은 추정 결과를 제공하는 것을 확인할 수 있다. MEMS형 저급 센서를 사용하는 경우 일시적인/영구적인 불확실 오차가 발생할 수 있다. 이런 경우 오차 모델링 불확실성에 의한 영향을 최소화 하기 위해 융합 필터는 좋은 선택이 될 수 있다.

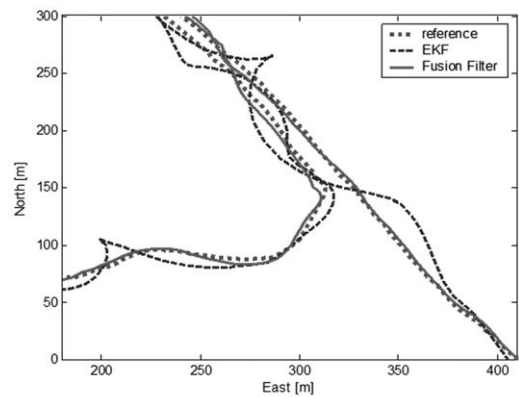
복합항법 필터로 구성된 복합항법시스템 기반으로 운전자 안전성 및 편의성 향상을 위한 증강현실 정보제공 시스템 기술이 개발되고 있다. 그림 20은 차량용 증강현실 기술의 개발 동향을 나타낸 것으로 BMW는 경로 유도 정보를 영상정보를 기반으로 주변 차량을 검출한 다음 상대적인 경로정보나 위험정보 등을 창 밖 도로 풍경의 해당 위치에 표시하는 기술을 컴퓨터 그래픽 기반으로 선보였으며, Pioneer에서는 운전이 필요한 정



(a) 시험 궤적



(b) 랜덤워크 오차 추가 전



(c) 랜덤워크 오차 추가 후

그림 19. IIR/FIR 융합 필터 성능 시험 결과.



(a) BMW



(b) Pioneer



(c) GM

그림 20. 차량용 증강현실 기술 개발 동향.

보를 환경 정보와 정합한 다음 화면의 위쪽에 나타냄으로써 운전자의 시야를 방해하지 않는 선에서 정보를 순간적으로 파악할 수 있도록 한 제품을 선보였다. 그리고 GM에서는 전체 Windshield 출력이 가능하도록 정보를 제공하는 기술을 선보이

고 있다. 현재 ETRI에서는 운전자 시야 중심으로 증강현실 기술을 출력하기 위해 복합항법시스템을 중심으로 Head Tracking, 주야간 Vision 처리 및 특징점 추출 기술, 데이터 정합 기술 등을 개발하고 있다. 차량용 증강현실 기술은 항법정보와 영상정보

를 융합하여 운전자에게 편리한 정보를 제공하고 위험상황에서 운전자에게 위험 경고 정보 및 안전한 경로 유도정보를 제공하는데 사용된다. ETRI에서 개발되는 항법 시스템은 INS/GPS/Vision 복합항법시스템으로 복합항법 필터를 기반으로 구동된다. 항법 결과는 다중 좌표계 기반의 정보를 정합하여 운전자 시야 중심으로 실 환경 위에 겹쳐 출력하는데 필요한 요소 기술로 사용된다.

IV. 결론

본 고에서는 보행자 및 차량용 항법 기술 개발 동향을 알아보았다. 보행자의 경우 Wi-Fi 및 IR-UWB/CSS 와 같은 무선통신 기반의 항법 기술과 센서 기반의 항법 기술 등에 대한 연구 동향을 소개하였으며 차량의 경우 센서 융합 기반 항법을 위한 융합 필터의 다양한 연구 개발 현황을 소개하였다. 항법 기술은 정확성/연속성/신뢰성 등을 고려하여 인프라, 센서의 단독사용 또는 융합이 이루어지며 응용 분야에 따라 여러 형태로 개발되고 있다. 보행자와 운전자에게 편리한 정보를 제공하는 항법 기술에서 안전한 정보를 제공하는 기술로 그 기술의 중요도도 향상되고 있으며 산업의 한 분야로 큰 부가가치를 창출할 뿐만 아니라 여러 융합 기술에서 핵심 기술 중 하나로 자리잡고 있다. 향후 항법 기술은 장애인/노약자를 위한 사회안전망과 연계한 기술로 승화하게 될 것이며 인간의 삶의 질을 더욱 향상시켜 줄 수 있는 핵심 기술로 자리잡게 될 것으로 전망된다.

참고문헌

- [1] E. D. Kaplan, *Understanding GPS Principles and Applications*, Artech House, Inc., 1996.
- [2] J. A. Tauber, *Indoor Location Systems for Pervasive Computing*, MIT, Aug. 2002.
- [3] K. W. Kolodziej and J. Hjelm, *Local Positioning Systems: LBS Applications and Services*, Taylor & Francis Group, 2006.
- [4] 위치정보의 보호 및 이용 등에 관한 법률, 법률 제11423호.
- [5] S. Y. Cho, "Localization of the arbitrary deployed APs for indoor wireless location-based applications," *IEEE Trans. Consumer Electronics*, vol. 56, no. 2, pp. 532-539, May 2010.
- [6] B. Li, Y. Wang, H. K. Lee, A. Dempster, and C. Rizos, "Method for yielding a database of location fingerprints in WLAN," *IEE Proceedings - Communications*, vol. 152, no. 5, pp. 580-586, 2005.
- [7] H. S. Kim, S. S. Sung, B. Li, W. S. Choi, and H. K. Lee, "Spatiotemporal location fingerprint generation using extended signal propagation model," *Journal of Electrical Engineering & Technology*, vol. 7, no. 5, pp. 789-796, 2012.
- [8] S. Y. Cho, and S. J. Yun, "Efficient fingerprint DB generation method for indoor wireless location using the environment analysis tool," *ION 2009 ITM*, Anaheim, USA, Jan. 26-28, 2009.
- [9] M. Enkhtur, and S. Y. Cho, "위치추정 핑거프린트 DB 구축 및 신호 전파 특성 지도 기반 효율적인 DB Update," *Telecommunications Review*, 제20권, 제6호, pp. 1017-1030, 2010. 12.
- [10] S. Y. Cho and Y. W. Choi, "Access point-less wireless location method based on peer-to-peer ranging of impulse radio ultra-wideband," *IET - Radar, Sonar, and Navigation*, vol. 4, iss. 5, pp. 733-743, Sep. 2010.
- [11] M. K. Oh, "IR-UWB packet-based precise ranging system for u-home networks," *IEEE Trans. Consumer Electronics*, vol. 55, no. 1, pp. 119-125, 2009.
- [12] S. Y. Cho and J. Y. Kim, "CSS 통신모듈간 P2P 거리추정 정보를 활용한 다중 보행자위치추정 시스템," *Telecommunications Review*, 제22권, 제4호, pp. 611-628, 2012. 08.
- [13] S. Y. Cho, "Local minimum problem of the ILS method for localizing the nodes in the wireless sensor network and the clue," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 17, no. 10, pp. 1059-1066, Oct. 2011.
- [14] S. Y. Cho and C. G. Park, "MEMS based pedestrian navigation system," *Journal of Navigation*, vol. 59, no. 1, pp. 135-153, Jan. 2006.
- [15] 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, Nov. 2011.
- [16] M. Chowdhary, M. Sharma, A. Kumar, S. Dayal, and M. Kumar, "Robust attitude estimation for indoor pedestrian navigation application using MEMS sensors," *ION GNSS 2012 Conference*, Nashville, USA, pp. 1658-1665, Sep. 2012.
- [17] S. Y. Cho, S. H. Shin, and C. G. Park, "Seamless 보행자 항법을 위한 MEMS 센서 기반 보행움직임 상황 인식 기술 및 결합 항법," *Telecommunications Review*, 제19권, 제1호, pp. 148-164, 2009. 02.

- [18] S. H. Shin, M. S. Lee, C. G. Park, and H. S. Hong, "Pedestrian dead reckoning system with phone location awareness algorithm," *IEEE/ION PLANS 2010*, Palm Springs, USA, May 3-6, 2010.
- [19] R. G. Brown and P. Y. C. Hwang, *Introduction to Random Signals and Applied Kalman Filtering*, John Wiley & Sons, 1985.
- [20] K. Reif, S. Gunther, E. Yaz, and R. Unbehauen, "Stochastic stability of the discrete-time extended Kalman filter," *IEEE Trans. Automatic Control*, vol. 44, no. 4, pp. 714-728, Apr. 1999.
- [21] S. Julier, J. Uhlmann, and H. Durrant-Whyte, "A new method for nonlinear transformation of means and covariances in filters and estimators," *IEEE Trans. Automatic Control*, vol. 45, no. 3, pp. 477-482, Mar. 2000.
- [22] S. Y. Cho, M. Enkhtur, and K. H. Kim, "다중속도 INS/GPS 결합항법시스템의 실시간 구현을고려한 수정된 UKF," 제어·로봇·시스템학회 논문지, 제19권, 제2호, pp. 87-94, 2013.
- [23] S. Y. Cho, M. Enkhtur, and K. H. Kim, "큰 초기 방위각 오차를 갖는 INS/GPS 결합항법장치를 위한 상호작용 다중 필터," submitted to 제어·로봇·시스템학회 논문지.
- [24] W. H. Kwon, P. S. Kim, and P. G. Park, "A receding horizon Kalman FIR filter for discrete time-invariant systems," *IEEE Trans. Automatic Control*, vol. 44, no. 9, pp. 1787-1791, Sep. 1999.
- [25] S. Y. Cho, and H. K. Lee, "Modified RHKF filter for improved DR/GPS navigation against uncertain model dynamics," *ETRI Journal*, vol. 34, no. 3, pp. 379-387, Jun. 2012.
- [26] S. Y. Cho, and W. S. Choi, "Robust positioning technique in low-cost DR/GPS for land navigation," *IEEE Trans. Instrumentation and Measurement*, vol. 55, no. 4, pp. 1132-1142, Aug. 2006.
- [27] S. Y. Cho, and B. D. Kim, "Adaptive IIR/FIR fusion filter and its application to INS/GPS integrated system," *Automatica*, vol. 44, iss. 8, pp. 2040-2047, Aug. 2008.