

# 센서융합 측위 기술의 현황과 연구 동향

공승현, 전상윤, 고현우  
한국과학기술원

## 요약

스마트폰이나 자율주행 자동차에서 필요로 하는 측위 및 항법 시스템은 실내외 및 다양한 지형 환경에서 높은 위치 정확도와 높은 측위 신뢰도를 요구한다. 따라서, 이러한 측위 시스템은 다양한 위치 측정 센서를 구비하고 센서 측정치들로부터 최적의 위치 추정치를 얻어내는 것을 목표로 한다. 본 고에서는 최적의 위치 추정치를 얻어내는 센서 융합 기술을 소개하고 센서 융합 기술에서 최신 연구 동향을 살펴본다.

## I. 서론

스마트폰이나 자동차의 항법장치에서는 GPS (Global Positioning System)이나 WiFi 뿐만 아니라 다양한 측위 센서를 사용하고 있다. 스마트폰의 경우 GPS, WiFi뿐만 아니라, 관성항법 시스템(INS)과 영상(Camera Vision), 그리고 최근에는 지자기 센서 (Magnetic sensor)를 이용하는 기술도 사용되고 있고, 자동차 항법 시스템에서는 GPS나 DGPS (Differential GPS), 그리고 Odometer와 같은 차체의 움직임 측정치를 활용하고 있다.

이렇게 다양한 측위 센서를 이용하는 것은 측위 센서들이 가질 수 있는 측정 오차와 측위 결과에 대한 높은 신뢰도 요구하기 때문이다. 흔히 사용되는 위치 센서들의 장단점을 생각해보면, GPS의 경우 지상에서 수신되는 신호가 미약하기 때문에, 다른 전파 간섭에 취약하고, 실내와 같이 LOS (Line of Sight)가 보장되지 않는 환경에서 신호 수신에 매우 어려워 실내나 지하, 건물 협곡과 같은 곳에서 측위가 어려우며, WiFi는 주변 신호원 (AP: Access Point)의 개수와 설치 간격 등에 따라서 측위 정확도가 달라지고, INS는 시간의 흐름에 따라 센서의 편향 (bias)과 잡음(noise)이 축적되어 측정치 출력에 반영되기 때문에 측위 정확도와 신뢰도가 급격히 저하되는 경향이 발생한다.

따라서, 위치 측정에 있어서 센서의 측정치를 효과적으로 사용하여 가장 높은 정확도와 신뢰도를 얻는 센서융합기술은 스

마트폰이나 자동차 항법 시스템에 있어서 중요한 기능을 담당하게 된다. 센서융합기술에서는 최적의 위치 추정을 위하여 각 센서들의 측정오차 성분에 대한 정확한 모델을 사용하므로, 센서들의 측정 오차에 대한 정확한 이해는 정확도와 신뢰도 향상에 매우 중요한 요소가 된다.

본 고에서는 먼저 주로 사용되는 위치 센서들의 측정 오차에 대하여 소개하고 (II장), 다양한 센서융합기술과 기술 동향에 대하여 소개한다 (III장). 추가로 IV장에서는 자동차 네트워크에서의 협력을 통한 융합항법기술과 기술 동향에 대해서 살펴본다.

## II. 측위를 위한 융합 기술의 다양한 위치 관련 센서/시스템

본 장에서는 측위에 사용되는 다양한 위치 관련 센서와 측정 오차를 간략히 소개한다.

### 1. 위성 항법시스템

#### 가. GNSS (Global Navigation Satellite system)

GPS 등을 포괄하는 위성 항법시스템(GNSS)은 우주 궤도를 따라 움직이는 동기화된 위성네트워크에서 각 위성들의 송신 신호가 지상의 수신기에 도달하는 시각을 측정하고 이를 통해 거리를 계산한 이후 삼각측량 방식으로 수신기의 절대 위치를 계산하는 시스템으로 수신기는 3차원 상의 위치와 속도를 얻을 수 있다. GNSS에는 다양한 오차성분이 있는데, 위성의 위치와 시각, 이온층 및 대기층에서 발생하는 전파 지연, 수신기의 측정 오차 등이 주요 오차 요인이며, 약간의 오차 보정으로 (표준 편차) 약 7미터까지 거리 측정 오차를 줄일 수 있다. 도심 지역에서 다중경로와 전파의 난반사로 인하여 발생하는 오차는 환경에 따라 다르며 수십에서 수백미터에 이르는 오차를 갖는다.

#### 나. DGNSS (Differential GNSS)

DGNSS는 지상의 Master Station을 통해 공통 오차(위성 시계오차, 위성궤도오차, 이온/전리층 오차)를 보정해 주는 시

스텝이다. 위성 항법시스템에 대한 자세한 내용은 ‘정밀 측위 기술 동향’에 기술되어 있다. 일반적으로 DGNSS는 (표준편차) 약 2미터이하의 거리 측정 오차를 갖지만, 수신기 측정 오차 및 다중경로 오차는 보정할 수 없어서 도심 다중경로 환경에서의 DGNSS 정확도는 GNSS와 크게 다르지 않다.

## 2. INS

관성항법장치(Inertial Navigation System, INS)는 가속도 센서와 자이로 센서를 사용하여 자세 및 가속도를 측정하고 이로부터 초기 위치를 기준으로 현재 위치를 측정할 수 있는 시스템이다. INS는 잡음과 편향(bias)이 위치 및 속도 측정치에 누적되어 나타나므로 오차가 급속히 발산하는 특성이 있는데, 그 발산의 정도는 제품마다 다르며, 잡음과 편향의 크기를 정확히 알고 사용하는 것이 중요하다. ‘정밀 측위 기술 동향’에서 INS에 대한 보다 자세한 설명이 기술되어 있다.

## 3. Vision

Vision navigation은 카메라 등을 통해 얻은 연속영상에서 대비가 확실한 특징 점이나 물체를 탐지하여 항법정보를 계산한다. 항법장치의 이동으로 특징 점이나 물체들이 연속 영상에서 이동하게 되는데 Vision navigation은 이러한 특징 점들의 이동경로를 추적해 상대적인 위치, 각도, 속도, 가속도 등의 정보를 얻는다[1].

## 4. Radar, Lidar

Radar와 Lidar는 송신한 전파가 물체에 반사되어 돌아오는데 걸리는 시간을 이용하는 센서로 각각 무선신호와 빛을 이용한다. 위 센서들은 상대적인 거리, 각도, 거리 및 각도 변화율을 제공한다. Radar와 Lidar에 대한 추가적인 설명은 ‘정밀 측위 기술 동향’에서 확인할 수 있다. 일반적으로 물체와의 거리가 멀어질수록 Radar와 Lidar의 측정 신뢰도가 떨어지며 오보(false alarm)율도 높아진다.

## 5. 지자기 센서 (Magnetometer)

실내 환경에서의 지구 자기장은 건축물의 철골 구조, 철재기구, 전자제품 등에 의해서 왜곡이 일어나기 때문에 공간에 따른 변화를 갖는다. 즉, 국소적으로 고유한 자기장의 분포가 생성되기 때문에 실내 자기장 분포에 대한 지도를 미리 구축해 놓으면 사용자의 위치 인식에 유용하게 활용될 수 있다. 지자기 센서는 일반적으로 3차원 상의 절대위치를 제공할 수 있지만, 센서의 편향(bias)이 쉽게 일어나고 주변 물체에 의하여 주변 자기장에 변형이 생길 수 있기 때문에, 주변 자기장에 왜곡 발생 여부와 왜곡이 발생한 경우에 대한 측정치 보정 기술이 필요하다. 보다

자세한 내용은 ‘영상 및 지자계를 이용한 실내 측위 기술 동향’에 기술되어 있다.

## 6. Wi-Fi

Wi-Fi 측위 기술로는 크게 핑거프린팅(Finger-Printing) 방식과 삼각측량 방식이 있다. 핑거프린팅 방식은 설치된 AP(Access Point)들의 신호세기(Received Signal Strength Indicator, RSSI) 지도(map)를 데이터베이스(DB)로 구축하여, 사용자가 측정된 RSSI값과 DB를 비교하여 위치를 추정하는 방식이며, 삼각측량 방식은 3개 이상의 AP의 RSSI 값을 측정하여 거리로 환산한 뒤 위치를 계산하는 방식이다. 알고리즘에 따라 절대 혹은 상대 위치결과를 얻을 수 있다. ‘실내 측위 연구 동향’에 보다 자세한 내용이 설명되어 있다.

## 7. Bluetooth Low Energy (BLE)

BLE를 이용한 측위 방식은 근접 비콘의 ID를 인식하여 해당 비콘의 위치로 추정하는 방식과, 주변 비콘들과 수신기의 거리값을 계산하여 다변측량(Multilateration) 하는 방식 등이 있다. 측위 방식에 따라 절대 혹은 상대 위치 결과를 제공한다.

# III. 센서/시스템 융합 기술

## 1. INS와 GPS기반 항법 시스템

INS와 GPS (Global Positioning System) 융합 항법 시스템은 항공 [2], 해양 [3] 그리고 지상 [4]에 이르기까지 다양한 시스템들에 널리 사용되고 있다. INS와 GPS를 융합하여 사용하는 이유는 두 센서들의 다음과 같은 상호보완적인 특성 때문이다. INS는 단기간 움직임에 대한 측정 성능이 뛰어나지만 시간에 따라 측정 오차가 급격히 발산한다는 문제점을 가지고 있다. 반면, GPS는 가시 위성 수가 충분한 야외 환경에서 일정한 오차 범위 이내의 측위 정보를 제공하며, 오차가 시간에 따라 변하지 않는다는 장점이 있다. INS와 GPS를 융합한 항법 시스템은 두 센서들의 정보를 확장칼만필터(Extended Kalman filter, EKF) 또는 파티클필터(Particle Filter, PF)와 같은 항법 필터로 융합하여 각각의 센서를 사용하는 것보다 향상된 측위 정확도를 제공한다.

본 고에서 소개하는 INS/GPS 융합항법 시스템은 두 센서의 결합 정도에 따라 약결합 또는 강결합 시스템으로 나눌 수 있다. INS와 GPS 약결합 시스템은 INS의 측위 결과와 GPS의 측위 결과를 융합하는 항법 시스템으로 구현이 쉽고 가시위성 수

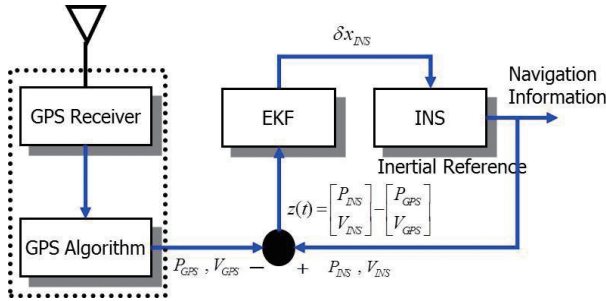


그림 1. 확장칼만필터기반 약결합 시스템의 구조

가 충분한 환경에서 측위 성능이 우수하다는 장점이 있다. 아래의 <그림 1>은 확장칼만필터를 항법 필터로 하는 약결합 시스템의 구조도를 나타낸다. <그림 1>의 P와 V는 각각 3차원 상의 위치와 속도 벡터를 의미하고  $\delta x$ 는 상태변이벡터를 의미한다. 이 상태변이벡터에는 항체의 위치, 속도, 자세, IMU 바이어스 등의 정보가 포함된다. 아래 첨자 INS와 GPS는 각각 INS와 GPS에 관한 변수들임을 나타낸다.

<그림 1>에 나타난 바와같이, 약결합 시스템은 이전에 추정된 상태변이벡터와 INS 그리고 GPS의 측위 정보를 조합하여 현재의 상태변이벡터를 추정한다. 약결합 시스템의 특성상 GPS의 측위 결과를 이용하기 때문에 가시위성 수가 4개 미만인 GPS 음영지역이나 다중경로 신호가 많은 도심환경에서 측위 성능이 감소하는 단점이 있다. 아래의 <그림 2>는 높은 건물이 밀집한 서울 테헤란로에서의 약결합 시스템의 항법 결과를 나타내며, 다중경로 신호로 인해 정확한 측위가 불가능한 것을 알 수 있다.

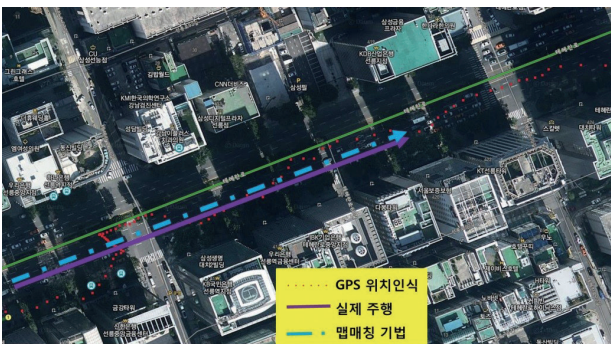


그림 2. 서울 테헤란로 환경에서의 약결합 항법해(빨간색 점선)와 실제 주행 궤적 (보라색 실선)

INS와 GPS 강결합 시스템은 GPS 수신기의 의사거리와 의사거리 변화율을 INS 측정치와 융합하는 항법 시스템이며 저가의 INS를 사용하였을 때, INS와 GPS 약결합 시스템에 비해 우수한 항법 성능을 가진다[5]. 그러나, INS와 GPS의 측위 결과를 융합하는 약결합 시스템에 비해 구현이 어렵다. INS와 GPS 강

결합 시스템 또한 약결합 시스템과 마찬가지로 GPS 음영지역이나 다중경로 신호 환경에서 그 성능이 감소하는 단점을 가진다.

일반적으로 INS와 GPS 융합 항법 시스템은 INS의 편향(bias)과 오차의 크기 정보가 필요하므로 사용 전 개략정렬(Coarse Alignment)과 정밀정렬(Fine Alignment)에 필요한 시간 동안 정지한 후 항법을 시작하며, 정지에 필요한 시간은 INS의 성능에 따라 달라진다[4]. 개략정렬은 가속도계와 자이로스코프의 측정치를 이용하여 INS가 초기 자세를 설정하는 과정이며 보다 정확한 자세 추정을 위하여 정지상태에서 일정 시간 동안 획득한 IMU 정보의 평균값을 사용한다. 정밀정렬 단계에서는 개략정렬을 통해 추정된 자세 정보를 정지상태의 속도가 0이라는 사실을 이용하여 보다 정밀하게 갱신한다.

두 센서를 사용하는 INS와 GPS융합 항법 시스템은 긴 터널 구간처럼 GPS 신호 수신에 장기간 동안 불가능한 구간에서는 INS의 영향으로 항법 오차가 발산하는 문제점이 있으며, 두 센서 중 하나만 고장 나도 항법 성능이 크게 감소하기 때문에 센서의 고장에 취약하다. 이 문제들을 해결하기 위하여 최근에는 다양한 센서들을 함께 융합하는 다중센서 기반 항법 시스템이 개발되고 있다[6].

## 2. 다중센서기반 항법시스템

다양한 센서들이 발달함에 따라 INS와 GPS 뿐만 아니라 추가적인 센서들을 함께 융합하는 다중센서기반 항법시스템들이 개발되었다. 추가적인 센서들의 사용은 보다 향상된 측위를 가능하게 하며, 일부 센서가 고장 나더라도 항법 오차가 발산하지 않는다는 장점을 준다. 다중센서기반 항법시스템의 예시로는 아래의 <그림 3>과 같은 확장칼만필터를 이용한 차량용 INS, GPS 그리고 Odometer (주행 기록계) 약결합 시스템이 있다. 이 시스템은 INS와 GPS 정보 이외에 차량에 부착된 Odometer의 속도정보를 융합함으로써 상태벡터를 보다 정밀하게 추정할

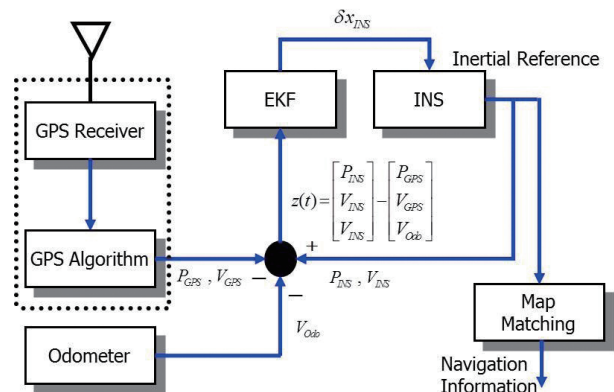


그림 3. 확장칼만필터 기반 INS, GPS, Odometer 약결합 시스템 구조

수 있다. <그림 3>에서 아래 첨자 Odo는 Odometer의 측정치임을 의미한다.

실내 측위에 사용할 수 있는 다중센서 기반 항법 시스템의 예시로는 아래의 <그림 4>와 같은 INS, Vision sensor, Barometer 그리고 Wi-Fi 약결합 시스템을 생각할 수 있다.

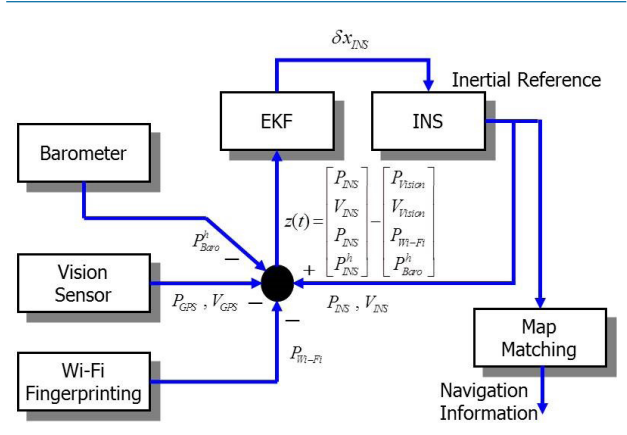


그림 4. 확장칼만필터 기반의 INS, Vision sensor, Barometer 그리고 Wi-Fi 약결합 시스템 구조

<그림 4>에서 아래 첨자 Baro와 Wi-Fi는 각각 Barometer와 Wi-Fi fingerprinting 기법을 이용한 측정치를 의미하며, 위 첨자 h는 고도를 의미한다. <그림 4>의 다중센서 기반 항법 시스템은 Vision sensor를 이용하여 위치와 속도 정보를 얻고 Wi-Fi fingerprinting 기법을 이용하여 위치 정보를 얻어 INS 정보와 융합한다.

### 3. 항법 필터

본 절에서는 여러 센서를 융합하기 위하여 흔히 사용하는 확장칼만필터, 파티클필터 그리고 연합형 칼만필터에 대해서 소개하고 각 필터들의 특징과 장단점에 대해서 다룬다.

#### 가. 확장칼만필터

확장칼만필터는 비선형 시스템의 상태벡터를 추정하기 위해 개발된 것으로 테일러(Taylor) 전개를 이용하여 시스템을 선형화한 후, 상태변이벡터를 추정한다. INS를 사용하는 항법 시스템의 경우, INS 순수항법에 사용되는 수식이 비선형이기 때문에 확장칼만필터가 센서들의 정보를 융합하는데 주로 사용된다. 확장칼만필터의 수식은 <표 1>과 같다[7].

표 1. 확장 칼만 필터 수식

$$\begin{aligned}
 x_{k+1} &= f(x_k) + w_k, \quad w_k \sim N(0, Q_k) \\
 z_k &= h(x_k) + v_k, \quad v_k \sim N(0, R_k), \quad (k = 1, 2, \dots) \\
 F_k(\hat{x}_{k-1}^+) &= \left. \frac{\partial f(x_k)}{\partial x_k} \right|_{x_k = \hat{x}_{k-1}^+}, \quad H_k(x_k^-) = \left. \frac{\partial h(x_k)}{\partial x_k} \right|_{x_k = x_k^-} \\
 &\quad \hat{x}_k^+ = f(x_{k-1}^+) \\
 P_k^- &= F_{k-1} P_{k-1}^+ F_{k-1}^T + Q_{k-1} \\
 K_k &= P_k^- H_k^T [H_k P_k^- H_k^T + R_k]^{-1} \\
 \hat{x}_k^+ &= x_k^- + K_k [z_k - h(x_k^-)] \\
 P_k^+ &= [I - K_k H_k] P_k^-
 \end{aligned}$$

위의 <표 1>에서 아래첨자  $k$ 는  $k$ 번째 이산 시간 (discrete time)을 의미하고  $f$ 와  $h$ 는 각각 시스템 모델과 측정 모델의 함수이다. 행렬  $P$ 는 추정된 상태변이벡터의 오차 공분산 (error covariance)이고,  $\cdot$ 는 추정치를 의미한다. 위의 수식에서  $-$ 와  $+$ 는 각각 시간 전파와 측정치 갱신을 통해 얻은 추정치임을 나타낸다. 공정잡음  $w_k$ 와 측정잡음  $v_k$ 는 각각 공분산이  $Q_k$ 와  $R_k$ 인 정규분포를 따른다.

확장칼만필터를 사용한 센서 융합 기술로는 앞에서 설명한 INS와 GPS 융합항법 시스템이 있다. 확장칼만필터를 사용하는 센서 융합 기술들은 시스템의 비선형성이 증가할수록 그 성능이 감소하게 된다. 그 이유는 비선형성이 클수록 테일러 전개 근사치(approximation)가 참값과 달라지기 때문이다. 또한 초기 위치 오차가 큰 경우에 테일러 전개의 선형화 지점이 잘못 지정되어 성능이 저하된다.

#### 나. 파티클필터

파티클필터는 순차적 몬테 카를로(Monte Carlo) 추정방법을 이용한 상태벡터 추정 기술로 다수개의 파티클을 생성하고 시스템 모델에 직접 대입하여 얻은 확률 분포를 이용한다. 따라서 상태벡터의 차원이 증가할수록 필요한 파티클의 수가 많아져 계산량이 증가한다는 단점이 있다. 반면, 파티클필터는 시스템의 비선형성이 크거나 시스템에 포함된 잡음이 정규분포를 따르지 않아도 사용 가능하다는 큰 장점을 가진다. 즉, 오차 분포에 대한 정확한 이해가 없어도 (거의) 최적의 정보융합이 가능하다.

파티클필터는 확장칼만필터와 마찬가지로 INS와 GPS 융합항법 시스템의 항법 필터로 사용될 수 있다. 사용된 파티클의 수가 충분히 많다면 파티클필터를 사용한 센서융합 항법 시스템의 성능이 확장칼만필터를 사용한 센서 융합 항법 시스템에 해 우수하다[7].

### 다. 연합형 칼만 필터

연합형 칼만필터는 여러 개의 부 필터와 한 개 이상의 주 필터로 이루어진다. 부 필터는 두 개 이상의 센서 정보를 융합하는 것으로 확장칼만필터 또는 파티클필터와 같은 필터들을 사용할 수 있다. 주 필터는 각 부 필터의 신뢰도에 비례하도록 가중치를 두어 부 필터들의 추정 결과를 융합한다. 주 필터의 추정치를 부 필터에 피드백하는 경우, 연합형 칼만 필터는 최적해를 제공한다. 1개의 부 필터로 추정한 상태벡터들은 <표 2>의 수식을 이용하여 주 필터에서 융합된다[8].

표 2. 연합형 칼만 필터 수식

$$P_{k,m}^{-1} = \sum_{i=1}^l P_{k,i}^{-1}$$

$$\hat{x}_{k,m} = P_{k,m} \left[ \sum_{i=1}^l P_{k,i}^{-1} x_{k,i} \right]$$

위의 <표 2>에서 m은 주 필터를 의미하고 i는 i번째 부 필터를 의미한다. INS와 GPS, Odometer를 융합하는 연합형 필터는 다음의 <그림 5>와 같이 구현할 수 있다. <그림 5>에서 점선은 피드백 루프를 의미하며 사용자의 판단에 따라 사용하지 않을 수 있다.

확장칼만필터 또는 파티클필터를 이용한 다중센서기반 항법 시스템은 센서의 수가 증가함에 따라 측정 벡터의 차원이 증가할 수 있으며, 항법해를 계산하는데 필요한 계산량을 증가시킨다는 단점이 있다. 반면, 연합형 칼만 필터를 이용한 다중센서기반 항법 시스템은 부 필터를 통해 측정 벡터의 차원을 증가시키지 않고 항법해를 계산할 수 있어, 센서 수의 증가에 따른 계산량의 증가율을 감소시킬 수 있다. 또한 각 센서를 따로 융합하기 때문에 센서의 고장 검출에 용이하다는 장점이 있다.

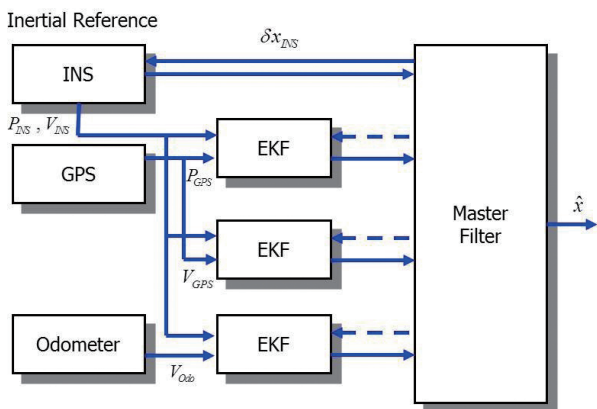


그림 5. INS, GPS 그리고 Odometer를 이용한 연합형 필터의 구조

## IV. 협력측위를 위한 융합 기술과 동향

앞서 살펴본 다중센서기반 항법 시스템은 측위를 수행하는 단말(스마트폰이나 자동차) 자체에 갖추어진 센서들을 사용하는 방식이다. 그러나 최근 들어 Device-to-Device (D2D), Vehicle-to-Everything (V2X)와 같은 단말간 통신 기술이 발전하면서[9], 서로의 위치 공유를 통해 측위 주체뿐 아니라 집단적으로 측위 정확도와 가용성을 높이는 협력측위(Cooperative Positioning) 방식이 연구되고 있다. 이하에서는 차량을 단말의 특정 예로 하여 설명한다. 협력측위 방식은 융합기술의 측면에서 볼 때, 센서끼리의 융합을 넘어선 차량 간의 융합측위 기술로 한 단계 진보된 측위 기술이다. 본 장에서는 협력측위 기술의 동향과 내용에 대해 살펴본다.

### 1. 협력측위 시스템의 개념 및 센서융합

협력측위 시스템은 차량과 차량 혹은 차량과 인프라(Infra) 간에 서로 측위 관련 정보(위치 상태벡터, 위치 분산)를 D2D 또는 V2X 기술을 통해 공유하고, 그 대상(차량 혹은 인프라)들과의 거리, 각도, 상대속도 등을 측정하고 가공하여 종합적인 위치를 추정한다.

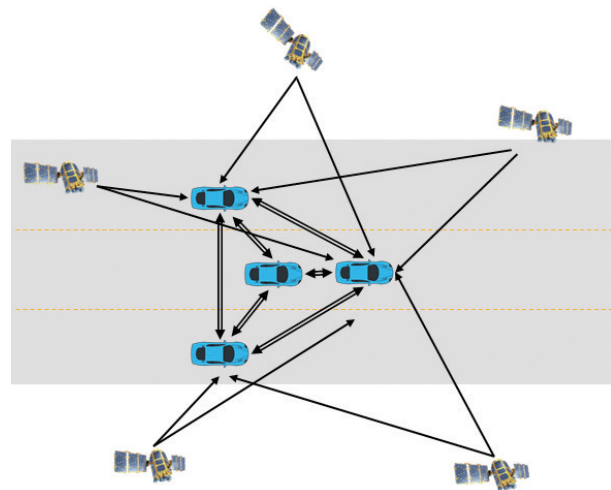


그림 6. GNSS 및 V2X 기반 협력측위 시스템

협력측위 시스템은 기존의 측위센서 시스템을 갖추고 있는 차량이 주변 차량과 통신할 수 있는 모듈과 상대방 차량에 대한 상대거리, 상대각도, 상대 속도 등을 측정할 수 있는 센서들을 추가로 가지고 있는 구조이다. 지금까지 소개되어 온 대부분의 협력측위 시스템은 무선 신호를 기반으로 상대방과의 거리를 측정하는 Radio ranging(예, UWB) 방식을 많이 사용하고 있으며[10], 그 외에도 도플러 변이(Doppler shift)를 측정하여 상

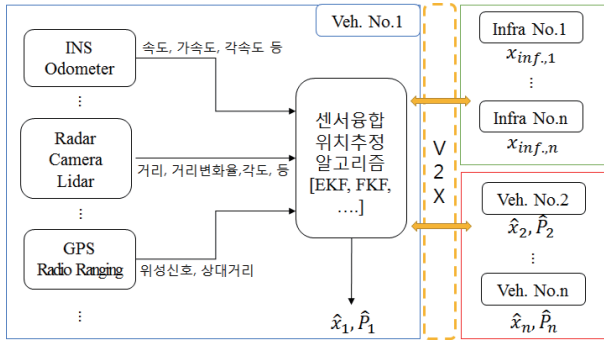


그림 7. 차량 협력측위 시스템

대속도를 계산하는 방식[11] 등이 소개되었다. 이 외에도 상대 차량과 자기 차량과의 공간적(Geometric) 관계를 측정할 수 있는 센서라면, 적절한 알고리즘을 통해 협력측위 시스템에서 사용 가능하다. 그 센서들의 예시로는 GNSS, Radar, Camera, Radio ranging, INS 등의 센서들이 있다. <그림 7>에는 차량 협력측위 시스템의 구조를 보인다.

협력측위 시스템은 정보를 공유하는 집단 전체의 측위 성능을 향상시키는 장점이 있다. 예를 들어, 도심협곡과 같이 기존의 GNSS 신호 음영지역에서 측위가 불가능 했던 상황에서 단일 차량의 정확도와 신뢰도가 높은 측위 방법이 불가능했지만, GNSS 기반 협력 시스템의 경우에 주변 차량의 협력을 통하여 높은 정확도와 신뢰도를 갖는 측위가 가능할 수 있다. 또한, 앞서 살펴본 다중센서기반 융합항법시스템은 사용 불가능한 센서가 있을 경우 전체 시스템의 성능이 하락하는 특징이 있는데 (예를 들어 GPS 음영지역에서 GPS/INS 약결합 시스템의 성능 하락), 협력시스템을 통해 이 문제점을 극복 할 수 있다. 또한 협력 시스템은 단일 차량이 아닌 다수의 차량을 사용하므로 고비용의 고성능 센서(Lidar 등)를 사용하지 않아도 높은 측위 성능을 보인다.

## 2. 협력측위 시스템의 센서융합 위치 추정 기술

협력측위 시스템에서 사용되는 다양한 센서들을 융합하기 위한 위치 추정 알고리즘은 다양하다. Least Square(LS), Kalman Filter(KF), Extended KF(EKF), Unscented KF(UKF), Particle Filter(PF), Belief Propagation(BP) 등의 알고리즘을 기반으로 하는 협력측위 기술들이 소개되어 왔다[12][13][14]. 본 절에서는 그 중에서도 계산량이 적고 센서융합에 널리 사용되고 있는 EKF 기반의 협력측위 기술인 hybrid-cooperative EKF(hcEKF)와 최근에 소개된 간단한 계산 형태를 가지면서 최적 근사해를 제공하는 BP 기반의 협력 측위 기술인 Hybrid Sum-Product Algorithm over Wireless Net-

Node  $i$ , time  $t$  에 대하여

**Measurements:**

- GPS 의사거리 측정치
- 차량간 상대 측정치(거리,각도 등)
- 상대차량의 위치정보

**Goal:**

- 자신의 state  $x_i^{(t)}$  결정

그림 8. hcEKF, H-SPAWN의 목표

work(H-SPAWN)에 대해 소개하도록 하겠다. 소개할 hcEKF와 H-SPAWN은 <그림 8>과 같은 공통 목표를 가진다.

### 가. hcEKF [12]

hcEKF는 센서 융합에 널리 사용되는 EKF를 기반으로 하는 협력측위 기술로써, 차량의 동적 모델 기반의 시스템 모델(System model)  $f$ 와 GPS 의사거리와 차량간 상대거리 측정치를 모델링 하여 측정 모델(Measurement model)  $h$ 로 이용하여 EKF 알고리즘으로 위치를 추정한다. <그림 9>는 hcEKF의 동작구조를 나타내며, 이때  $x_i^{(t)}$ 는  $i$  번째 차량의 상태 벡터를 나타내고,  $\hat{x}_i^{(t)}$ 는 추정된 상태벡터,  $\hat{x}_i^{(t)-}$ 는 예측된 상태벡터,  $C$ 는 상태벡터  $x$ 의 분산행렬,  $K^{(t)}$ 는 칼만 이득,  $P_s^{(t)}$ 와  $\hat{P}_n^{(t)}$ 는 각각 위성의 위치와 추정된 이웃 차량의 위치를 나타낸다. 또한  $A$ 와  $W$ 는 각각 시스템 모델  $f$ 의 시스템 및 노이즈 Jacobian 행렬이며,  $H$ 와  $V$ 는 측정 모델  $h$ 의 시스템 및 노이즈 Jacobian 행렬이다. 변수  $Q$ 와  $R$ 은 각각 시스템, 측정치 오차 공분산 행렬을 나타낸다. 이 기술은 많이 알려진 EKF를 기반으로 하기 때문에 적용이 쉽지만 그 성능이 BP나 PF를 기반으로 하는 협력 측위 기술에 비해 떨어진다[16].

### 나. H-SPAWN [15]

H-SPAWN은 2011년 처음 소개된 기술로 GPS와 UWB를 사용하고 BP 알고리즘을 바탕으로 한다. 이 기술은 hcEKF

• Prediction step

$$\begin{aligned} \hat{x}_i^{(t)-} &= f(\hat{x}_i^{(t-1)}) \\ C_i^{(t)-} &= AC_i^{(t-1)}A^T + WQW^T \end{aligned}$$



• Measurement update step

$$\begin{aligned} K^{(t)} &= C_i^{(t)-}H (HP_i^{(t)-}H^T + VRV^T)^{-1} \\ C_i^{(t)} &= (I - K^{(t)}H)C_i^{(t)-} \\ \hat{x}_i^{(t)} &= \hat{x}_i^{(t)-} + K^{(t)}(z^{(t)} - h(\hat{x}_i^{(t)-}, P_s^{(t)}, \hat{P}_n^{(t)})) \end{aligned}$$

그림 9. hcEKF의 동작구조

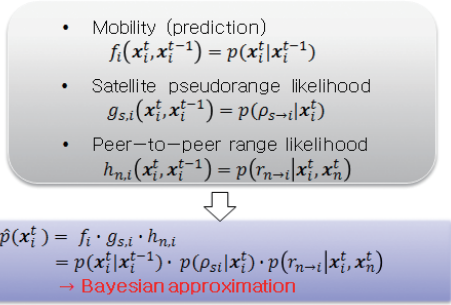


그림 10. H-SPAWN의 동작구조

와 마찬가지로 GPS 음영지역에 위치한 차량의 측위가 가능하고 전체 차량의 위치 정확도를 향상시킨다. 또한 도심 협곡에서 1~3개의 GPS 신호만 수신할 수 있는 차량의 측위 정확도 향상시킬 수 있으며, 차량네트워크 기술의 발전으로 협력적 차량 항법 시스템에 유용한 기술로 예상된다.

〈그림 10〉은 H-SPAWN의 목표와 동작구조를 나타낸다. hcEKF와 마찬가지로 H-SPAWN에서는 GPS 의사거리 측정치, 차량간 상대거리 측정치, 상대차량의 위치정보를 사용하여 모든 차량들이 각기 자기 차량의 위치 상태벡터를 계산한다. 이를 위하여 우선, 차량의 다이내믹스(Dynamics)로부터 계산된 위치 예측치(Odometer 혹은 INS를 통해 계산)의 확률  $f_i(x_i^t, x_i^{t-1})$ 를 계산하고, 위성 의사거리 측정치의 우도함수(Likelihood)  $g_{s,i}(x_i^t, x_i^{t-1})$ , 차량간 상대거리 측정치의 우도함수  $h_{n,i}(x_i^t, x_i^{t-1})$ 를 계산한다. 이때,  $p(\cdot)$ 는 확률(probability)을 나타낸다. 앞서 계산한 차량 예측치(prediction)와 측정치 우도함수 값들을 곱하고, 그 과정을 반복과정(iteration)을 거쳐 최적 근사 해 (Bayesian 근사 해)를 구하여 위치를 추정한다.

hcEKF와 H-SPAWN 알고리즘은 GNSS와 Radio ranging 센서/시스템을 사용하였지만, 적절한 측정치 모델링을 통해 Radar, Vision 등의 다양한 센서/시스템을 추가해서 사용할 수 있다. hcEKF와 H-SPAWN의 성능에 대해 비교해 보고자 〈그림 11〉과 같은 시나리오를 설정하였다. 도심에서 주행하는 9대의 차량이 〈그림 11〉과 같은 대형으로 주행하며, 각 차량의 위성 수신 상황과 V2V로 연결된 네트워크 상황은 서로 다르다. 괄호 안의 숫자는 각각 해당 차량이 수신하고 있는 Line-of-Sight(LOS) 위성과 Non-Line-of-Sight(NLOS) 위성의 수를 나타내며, 자체적으로 위치 결정을 하기 위한 LOS의 GPS 위성 수가 0~3개인 차량들로 섞여있다. GPS 의사거리 잡음은  $1\sigma$ 가 약 7.5m이고 평균이 0인 가우시안 분포를 따르고, NLOS에 의해 생기는 지연(delay) 오차는 10~200m의 범위를 가지는 채널환경을 가정하여 시뮬레이션 하였다. 차량들은 V2V를 통하

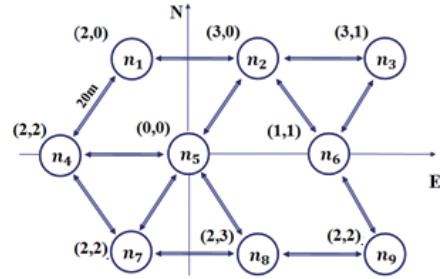


그림 11. 협력시스템 시나리오

여 서로 측위 관련정보(위치 상태벡터, 위치 공분산)를 공유하고 UWB를 이용하여 상대 거리를 측정한다.

기존의 측위 시스템이라면 위성 수가 3개인 차량을 제외한 나머지 차량은 위치를 추정할 수 없거나 매우 큰 위치 오차를 가질 것이다. 그러나 협력 시스템에서는 모든 차량의 측위가 가능해지며, 이는 각 차량 별 Root-Mean-Square (RMS) 위치 오차를 나타내는 그림 12를 통해 확인할 수 있다. GPS 의사거리 오차가 노이즈( $1\sigma = 7.5m$ )와 NLOS 지연(10~200m)을 포함한 것을 감안했을 때, hcEKF가 약 3~20m, H-SPAWN이 약 2.5~15m의 3차원 위치 오차를 갖는다는 것은 충분히 좋은 성능을 보이는 것으로 생각할 수 있다. (2차원 도로 평면에서는 더 작은 오차가 된다.)

〈그림 12〉에 도시된 바와같이 hcEKF가 H-SPAWN에 비해 성능이 낮은 것을 확인할 수 있으나 전체적인 경향은 비슷하게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 즉, NLOS 위성이 없는 1, 2번 차량의 위치 정확도가 높고, NLOS의 수가 많은 4, 7, 8, 9번 차량의 위치 정확도가 낮은 것을 확인할 수 있다. 위성을 전혀 수신하지 못하는 5번 차량의 경우 연결된 주변의 4대의 차량들로 인해 위치를 계산할 수 있으며, 직접적으로 NLOS 위성에 노출되지 않아 위치 정확도가 상대적으로 높은 것을 확인할 수 있다.

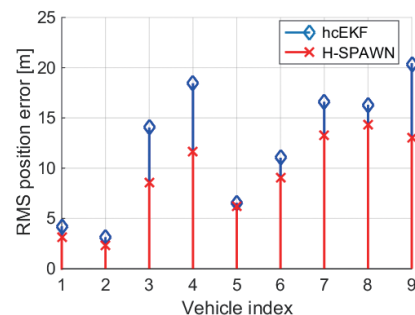


그림 12. 위치 RMSE 성능 [m]

## V. 결론

본고에서는 스마트폰 및 자동차 항법시스템에서 널리 활용되고 있는 융합측위 기술들에 대하여 살펴보았다. 일반적인 예로 확장형 칼만필터를 이용하여 센서융합 측위를 구현하는 스마트폰과 자동차의 융합항법 시스템을 살펴보았고 추가로 연합형 칼만필터 시스템도 소개하였다. 또한 장치간 통신이 가능한 상황에서 가까운 미래의 기술로 협력측위 시스템을 최신 기술인 hcEKF와 H-SPAWN를 예로하여 살펴보았다. 시뮬레이션을 통하여 확인한 결과 협력측위 시스템의 성능은 GPS의 다중경로 및 음영지역에 대한 문제를 크게 향상시킬 수 있고 연결된 주변 모든 단말기의 측위 성능을 크게 향상시킬 수 있음을 확인하였다.

## 참고 문헌

- [1] B. Priot, C. Peillon, V. Calmettes, and M. Sahnoudi, "Performance Assessment of an Ultra-Tightly Coupled Vision-Aided INS/GNSS Navigation System", ISAE, Université de Toulouse, France, ION 2011.
- [2] C.-S. Yoo and I.-K. Ahn, "Low cost GPS/INS sensor fusion system for UAV navigation", IEEE Conf. DASC'03, vol. 2, pp. 8.A.1 - 8.1-9.
- [3] Y. Yanjuan, W. Tian, and Z. Jin, "Study on a novel marine INS/GPS integrated navigation technology", IEEE ICARCV 2002, vol. 3, pp. 1563 - 1567.
- [4] E.-H. Shin, "Accuracy Improvement of Low Cost INS/GPS for Land Applications", UCGE Reports, no. 20156, 2001.
- [5] X. Chen, J. Yu, and M. Gu, "Study on Tightly-Coupled GPS/SINS Integrated Navigation System by Using Software GPS Receiver", IEEE I2MTC, Binjiang, China, May, pp. 1-4, 2011.
- [6] G. H. Kim and S. -H. Kong, "High-speed train navigation system based on multi-sensor data fusion and map matching algorithm", Int. J. Contr., Autom. and Syst., vol. 13, no. 3, pp. 1-10, 2015.
- [7] D. Simon, Optimal estimation, 1st ed, New Jersey, U.S.A.: Wiley Intersci., 2006.
- [8] N. A. Carlson, "Federated Square Root Filter for Decentralized Parallel Processes", IEEE Trans. Aero. and Electro. syst., vol. 26, no. 3, 1990.
- [9] E. Uhlemann, "Introducing Connected Vehicles," IEEE Veh. Technol. Mag., vol. 10, pp. 23-31, Mar. 2015.
- [10] H. Wymeersch, J. Lien, and M. Z. Win, "Cooperative Localization in Wireless Networks," in Proc. IEEE, vol. 97, no. 2., pp. 427-450, Feb. 2009.
- [11] N. Alam, A. T. Balaei, and A. G. Dempster, "A DSRC Doppler-based cooperative positioning enhancement for vehicular networks with GPS availability," IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 60, pp. 4462-4470, Nov. 2011.
- [12] M. A. Caceres, F. Sottile, R. Garello, and M. A. Spirito, "Hybrid GNSSToA localization and tracking via cooperative unscented Kalman filter," in Proc. IEEE 21st Int. Symp. Personal, Indoor, Mobile Radio Commun. (PIMRC), Istanbul, Turkey, Sep. 2010, pp. 271-275.
- [13] F. Sottile, H. Wymeersch, M. A. Caceres, and M. A. Spirito, "Hybrid gnss-terrestrial cooperative positioning based on particle filter," in Proc. IEEE Global Commun. Conf. (Globecom), Houston, Texas, 2011, pp. 1-5.
- [14] F. R. Kschischang, B. J. Frey, and H. A. Loeliger, "Factor graphs and the sum-product algorithm," IEEE Trans. Inf. Theory, vol. 47, no. 2, pp. 498-519, Feb 2001.
- [15] M. A. Caceres, F. Penna, H. Wymeersch, and R. Garello, "Hybrid Cooperative Positioning Based on Distributed Belief Propagation," IEEE J. Sel. Areas Commun., vol. 29, pp. 1948-1958, Dec. 2011.
- [16] R. Garello, J. Samson, M. A. Spirito, and H. Wymeersch, "Peer-to-Peer Cooperative Positioning Part2: Hybrid Devices with GNSS & Terrestrial Ranging Capability", InsideGNSS Mag., pp. 56-64, Jul. 2012.

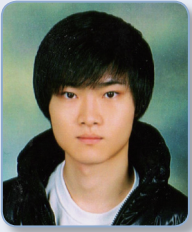


## 약 력



공 승 현

1992년 서강대학교 공학학사  
1994년 Polytechnic University 공학석사  
2006년 Stanford University 공학박사  
2010년 한국과학기술원 조교수  
2014년~현재 한국과학기술원 부교수  
관심분야: 차세대 GNSS, 항법 시스템의 고급  
신호처리, 차량간 통신 시스템



전 상 윤

2014년 한국과학기술원 공학학사  
2014년~현재 한국과학기술원 공학석사과정  
관심분야: 센서융합, 항법 시스템, 측위기술



고 현 우

2014년 한동대학교 공학학사  
2014년~현재 한국과학기술원 공학석사과정  
관심분야: 자율주행시스템, 센서융합, 측위기술