

# 와이파이 수신신호세기를 사용하는 실내위치추정의 성능 향상을 위한 수정된 잔차 기반 확장 칼만 필터

## A Modified Residual-based Extended Kalman Filter to Improve the Performance of WiFi RSSI-based Indoor Positioning

조 성 윤\*  
(Seong Yun Cho<sup>1,\*</sup>)

<sup>1</sup>Department of Applied Robotics, Kyungil University

**Abstract:** This paper presents a modified residual-based EKF (Extended Kalman Filter) for performance improvement of indoor positioning using WiFi RSSI (Received Signal Strength Indicator) measurement. Radio signal strength in indoor environments may have irregular attenuation characteristics due to obstacles such as walls, furniture, etc. Therefore, the performance of the RSSI-based positioning with the conventional trilateration method or Kalman filter is insufficient to provide location-based accurate information services. In order to enhance the performance of indoor positioning, in this paper, error analysis of the distance calculated by using the WiFi RSSI measurement is performed based on the radio propagation model. Then, an IARM (Irregularly Attenuated RSSI Measurement) error is defined. Also, it shows that the IARM error is included in the residual of the positioning filter. The IARM error is always positive. So, it is presented that the IARM error can be estimated by taking the absolute value of the residual. Consequently, accurate positioning can be achieved based on the IEM (IARM Error Mitigated) EKF with the residual modified by using the estimated IARM error. The performance of the presented IEM EKF is verified experimentally.

**Keywords:** indoor positioning, WiFi RSSI, irregularly attenuated RSSI measurement, EKF, residual

### I. 서론

실내위치추정 기술은 항법, 통신, 공간정보, 컴퓨터 등의 분야에서 새로운 가치창출을 목적으로 오늘날 다양한 연구 분야에서 연구개발하고 있다. 그러나 실외에서 GPS (Global Positioning System) 기반으로 손쉽게 위치정보를 획득할 수 있는 것과 비교하여 실내에서는 해결해야 하는 다양한 문제를 포함하고 있어 실 구현 및 상용화에 어려움을 겪고 있는 뜨거운 감자로 자리잡고 있다[1,2].

GPS 기반의 실외위치추정의 상용화 성공 비결은 항상 위성신호를 받을 수 있는 기 구축되어 있는 우주부분(space segment)과 위성신호의 무료화, 그리고 값싼 수신모듈의 보급화에 있다. 오늘날 이와 유사한 특성을 가진 실내 영역에서의 인프라로 와이파이(WiFi)를 들 수 있다. 통신을 목적으로 실내에 설치되어 있는 수 많은 와이파이 AP (Access Point)로부터 신호를 대부분의 실내 공간에서 받을 수 있으며 또한 통신이 아닌 위치추정에 필요한 수신신호세기(RSSI: Received Signal Strength Indicator) 정보는 항상 무료로 활용할 수 있다. 또한 널리 보급되어 사용하고 있는 스마트폰 및 다양한 무선 단말기에 와이파이 송수신 모듈이 기본적으로 탑재되어 있다. 따라서 최근 와이파이 기반의 실내위치추정 기술이 활발하게 연구개발 되고 있으며 상용화도 이루어지고 있다. 그러나 와이파이 기반 실내위치추정 기술은 RSSI 정보를 사용함에 따른 낮은 정확도 문제를 갖고 있다. 이 문제를 해결하기

위해 전자지문기법(fingerprint method)이 사용되고 있으나 이를 위한 데이터베이스 구축 및 유지관리에 많은 인력과 시간 및 비용을 필요로 하므로 폭넓은 상용화에 걸림돌이 되고 있다[3-5].

본 논문에서는 와이파이 RSSI 정보를 사용하여 위치추정을 할 수 있는 손쉬운 방법 중 하나인 삼변측량법(trilateration method)을 기본으로 한다. 우선 획득된 RSSI 정보를 전파전달(radio propagation) 모델 기반으로 AP와 단말기 사이의 거리 정보로 변환한다. 이렇게 변환된 거리정보와 AP 위치정보를 사용하여 단말의 위치를 추정한다[6-9]. 이때 사용할 수 있는 추정기법으로는 반복최소자승법 (ILS: Iterative Least Squares)과 DS (Direct Solution) 및 DSRM (Difference of Squared Range Measurements) 등의 닫힌 형태의 해(CFS: Closed-Form Solution), 그리고 필터를 사용하는 방법 등이 있다[10,11]. 실내 공간에서 전파되는 신호는 공기 중 전파뿐 아니라 벽 및 구조물에 의한 투과와 다중경로 및 NLOS (Non-Line-of-Sight) 신호 등에 의해 오염되어 있으며 이로 인하여 획득된 RSSI 정보의 전파전달 모델 기반으로 계산된 거리정보는 위치에 따라 크고 작은 오차를 포함하게 된다. 이런 측정치를 사용하여 ILS 및 CFS 기반으로 추정된 단말의 위치는 큰 오차를 갖는다. 이에 반해 필터 기반의 위치추정에서는 측정치뿐 아니라 단말의 동적 모델(dynamic model)을 함께 사용하여 위치를 추정하므로 실내 공간에서 불규칙적으로 감쇠된 RSSI 측정치(IARM: Irregularly Attenuated RSSI Measurement)에 의해 발생하는 위치추정 오차가 ILS 및 CFS 기법에 비해 상대적으로 적게 발생할 수 있다. 또한 오차를 모델링 할 수 있다면 필터에서 추정 보상 또한 가능하게 된다. 그러나 IARM 오차

\* Corresponding Author

Manuscript received August 27, 2014 / revised January 30, 2015 / accepted February 5, 2015

조성윤: 경일대학교 로봇응용학과(sycho@kiu.kr)

는 채널간, 시간적 상관성을 모델링 하기 어려우므로 필터에서 추정 보상하기 어렵다.

본 논문에서는 IARM 오차가 항상 양의 실수를 갖는다는 특성을 고려하여 필터의 잔차(residual)에서 IARM 오차를 추정하는 방법을 제안한다. 먼저 필터의 잔차에는 IARM 오차와 위치추정 오차에 의한 거리 반영 오차 및 백색잡음이 포함되어 있는 것을 설명하고, 잔차의 절대값을 통해 IARM 오차를 추정할 수 있음을 제안한다. 이때 잔차에 포함된 위치 오차에 의한 거리 반영 오차는 측정치 갱신(measurement-update)을 함에 따라 작아질 것으로 가정한다. 이렇게 추정된 IARM 오차를 사용하여 필터의 잔차를 수정함으로써 IARM 오차에 의한 위치추정 오차를 감소시키게 된다. 본 논문에서는 기본적인 일정 속도(CV: Constant Velocity) 모델을 사용하는 EKF (Extended Kalman Filter)를 사용하여 필터를 구성한다 [12].

제안된 방법의 타당성 및 성능 검증을 위하여 시험을 수행하였다. 다수의 와이파이가 AP가 설치된 실내 공간에서 RSSI 정보를 획득할 수 있는 소프트웨어를 스마트폰에 탑재하고 스마트폰을 소지한 보행자가 실내 공간을 보행하면서 획득한 RSSI 정보 및 AP 위치정보를 사용하여 스마트폰의 위치를 추정하는 알고리즘을 후처리로 구동하였다. 시험 결과 제안된 방법에 의해 채널별(channel-wise) IARM 오차를 잘 추정하며 이로 인해 추정된 위치정보의 정확도가 기존의 방법 대비 크게 향상되는 것을 보인다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. II 장에서 와이파이 수신신호세기의 전파전달 모델 기반의 거리계산에 대해 설명하고, III 장에서는 수정된 잔차 기반 시그마 포인트 칼만 필터를 제시하고 이를 기반으로 한 위치추정 필터를 설계한다. IV 장에서는 시험 분석을 통해 제안된 기법의 타당성 및 성능을 검증하고 마지막 장에서는 결론을 맺는다.

## II. 와이파이 수신신호세기의 전파전달모델 기반의 거리계산

### 1. 전파전달 모델 기반 거리계산

송신기 안테나를 떠난 모든 종류의 무선신호는 공기 중 전파하면서 그 신호의 세기가 점차 감소하게 된다. 또한 무선신호가 전파하면서 구조물을 만나게 되면 투과(penetration), 반사(reflection), 회절(diffraction) 및 산란(scattering)을 하게 되며 이 경우 또한 구조물의 구성물질의 특성과 신호의 입사각 등에 따라 신호의 세기가 감소하게 된다. 특히 실내 환경에서는 다양한 실내 구조물과 벽 등에 의하여 불규칙적인 신호 감쇠 현상이 발생하며 단말기에서 측정된 RSSI 정보에 이 현상이 반영된다. 광선 추적법(ray tracing)과 같은 연구영역에서는 정확하게 모델링된 실내 구조물과 무선신호의 특성을 기반으로 위치에 따른 RSSI 정보를 비교적 정확하게 계산한다. 그러나 위치추정 분야에서는 다음과 같이 비교적 간단한 전파전달 모델을 사용하여 전파거리에 따른 신호의 세기 관계식을 구성한다[5-9].

$$\begin{aligned} \tilde{S}_k^j &= \bar{S} - 10 \log_{10} \frac{r_k^j}{\bar{r}} - \delta S_k^j + v_k^j \\ &\equiv S_k^j - \delta S_k^j + v_k^j \end{aligned} \quad (1)$$

여기서  $\tilde{S}_k^j$ 는 시간  $k$ 일 때 AP  $j$ 로 부터 거리  $r_k^j$  [m] 떨어져

있는 단말기에서 획득되는 RSSI [dBm]를 나타낸 것이며,  $\bar{S}$ 는 안테나의 송출 파워를 정의하기 위한 것으로 기준거리  $\bar{r}$ 에서의 RSSI를 나타낸 것이다.  $a$ 는 공간상의 감쇠율(attenuation factor)을 나타낸 것이며  $v_k^j$ 는 백색잡음을 나타낸 것이다. 그리고  $\delta S_k^j$ 은 IARM을 나타낸 것으로 다음과 같이 항상 양의 값을 가지며[5,13], 채널간 그리고 시간적 상관관계가 없는 특성을 갖는다.

$$\delta S_k^j > 0 \quad (2)$$

$$E[\delta S_{k_1}^j \delta S_{k_2}^j] = 0 \quad (3)$$

$$E[\delta S_k^j \delta S_k^i] = 0 \quad (4)$$

여기서  $k_1 \neq k_2$  그리고  $j \neq i$ .

RSSI 데이터가 Line-of-Sight 신호인 경우에 발생하는 IARM 오차는 신호가 벽, 가구 등을 통과하면서 발생하는 오차로 신호가 장애물을 투과하면서 신호가 약해지므로 IARM 오차가 양의 값을 갖게 된다. 그리고 RSSI 데이터가 NLOS 신호인 경우 이동 경로가 길어지면서 발생하는 IARM 오차로 전파전달 모델을 기반으로 분석할 때 양의 값을 갖게 된다.

(1)에서  $a$ 와  $\bar{S}$ 는 응용공간 내에서 AP로부터 일정 거리에서 획득된 다수의 측정치를 사용하여 추정할 수 있다. (1)을 통해 RSSI 정보를 거리정보로 변환하면 다음과 같이 나타낼 수 있다[6].

$$\tilde{r}_k^j = \bar{r} \cdot 10^{\tilde{S}_k^j / 10} \quad (5)$$

여기서

$$\tilde{r}_k^j = \frac{\hat{S} - \tilde{S}_k^j}{10\hat{a}} \quad (6)$$

### 2. 오차분석

(1)을 (6)에 대입하여 전개하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \tilde{r}_k^j &= \frac{\hat{S} - (S_k^j - \delta S_k^j + v_k^j)}{10\hat{a}} \\ &= \frac{\hat{S} - S_k^j}{10\hat{a}} + \frac{\delta S_k^j}{10\hat{a}} + \frac{-v_k^j}{10\hat{a}} \end{aligned} \quad (7)$$

(7)을 (5)에 대입하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \tilde{r}_k^j &= \bar{r} \cdot 10^{(\hat{S} - S_k^j) / 10\hat{a}} \cdot 10^{\delta S_k^j / 10\hat{a}} \cdot 10^{-v_k^j / 10\hat{a}} \\ &= r_k^j \cdot 10^{\delta S_k^j / 10\hat{a}} \cdot 10^{-v_k^j / 10\hat{a}} \end{aligned} \quad (8)$$

여기서  $r_k^j$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} r_k^j &= \sqrt{(x^j - x_k)^2 + (y^j - y_k)^2} \\ &= \sqrt{(x^j - (\hat{x}_k + \delta x_k))^2 + (y^j - (\hat{y}_k + \delta y_k))^2} \end{aligned} \quad (9)$$

여기서  $[x^j \ y^j]^T$ 와  $[\hat{x} \ \hat{y}]^T$ 는 각각 AP  $j$ 와 단말기의 2-D 위치를 나타낸 것이며  $[\delta x \ \delta y]^T$ 는 위치추정 오차를 나타낸 것이다.

(9)를 Taylor 급수 1차 전개를 통해 선형화 하면 다음과 같

이 나타낼 수 있다.

$$r_k^j = \sqrt{(x^j - (\hat{x}_k + \delta x_k))^2 + (y^j - (\hat{y}_k + \delta y_k))^2} \quad (10)$$

$$\cong \hat{r}_k^j - \frac{x^j - \hat{x}_k}{\hat{r}_k^j} \delta x_k - \frac{y^j - \hat{y}_k}{\hat{r}_k^j} \delta y_k$$

여기서

$$\hat{r}_k^j = \sqrt{(x^j - \hat{x}_k)^2 + (y^j - \hat{y}_k)^2} \quad (11)$$

(8)의 마지막 두 항의 1차 Maclaurin 급수를 구하면 다음과 같다.

$$10^{\delta S_k^j / 10\hat{\alpha}} \cong 1 + \ln(10^{1/10\hat{\alpha}}) \cdot \delta S_k^j \quad (12)$$

$$10^{-v_k^j / 10\hat{\alpha}} \cong 1 + \ln(10^{-1/10\hat{\alpha}}) \cdot v_k^j \quad (13)$$

(10), (12) 그리고 (13)을 (8)에 대입하여 오차의 제곱 항 이상을 무시하고 정리하면 다음과 같다.

$$\tilde{r}_k^j \cong \left( \hat{r}_k^j - \frac{x^j - \hat{x}_k}{\hat{r}_k^j} \delta x_k - \frac{y^j - \hat{y}_k}{\hat{r}_k^j} \delta y_k \right) \left( 1 + \ln(10^{1/10\hat{\alpha}}) \cdot \delta S_k^j \right) \left( 1 + \ln(10^{-1/10\hat{\alpha}}) \cdot v_k^j \right) \quad (14)$$

$$\cong \hat{r}_k^j + \delta r_k^j(\delta \hat{P}) + \delta r_k^j(\delta S) + \delta r_k^j(v)$$

여기서  $\delta r_k^j(\delta \hat{P})$ ,  $\delta r_k^j(\delta S)$  그리고  $\delta r_k^j(v)$ 는 각각 위치추정 오차, IARM 오차 그리고 백색잡음에 의해 발생하는 거리 계산오차를 나타낸 것으로 각각 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\delta r_k^j(\delta \hat{P}) = \begin{bmatrix} -\frac{x^j - \hat{x}_k}{\hat{r}_k^j} & -\frac{y^j - \hat{y}_k}{\hat{r}_k^j} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta x_k \\ \delta y_k \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\delta r_k^j(\delta S) = \hat{r}_k^j \ln(10^{1/10\hat{\alpha}}) \cdot \delta S_k^j \quad (16)$$

$$\delta r_k^j(v) = \hat{r}_k^j \ln(10^{-1/10\hat{\alpha}}) \cdot v_k^j \quad (17)$$

### III. 실내위치추정용 수정된 잔차 기반 확장 칼만 필터

필터의 응용을 위해서는 응용 대상의 동적 모델 및 추정하고자 하는 상태변수를 결정하고 상태변수 추정에 효율적인 필터의 종류를 선택한다. 이를 기반으로 시스템 모델과 측정치 모델을 설정하고 초기화를 수행한다. 이때 초기화는 상태변수 및 상태변수 오차 공분산 행렬( $P$ ), 공정잡음 공분산 행렬( $Q$ ) 그리고 측정치 오차 공분산 행렬( $R$ )의 초기화를 포함한다. 필요에 따라 필터의 운용 방법을 수정하거나 필터간의 융합을 하기도 한다[14].

본 논문의 무선위치추정 응용 대상은 보행자로 한다. 보행자는 걸음의 속도가 바뀌기도 하고 보행 방향이 바뀌기도 한다. 이를 제대로 반영하기 위해서는 다중 모델(IMM: Interacting Multiple Model) 필터를 사용해야 한다[15]. 그러나 보행자의 보행 속도가 비교적 느리므로 계산량이 크게 증가하는 IMM 필터 대신 대표적인 동적 모델인 일정 속도(CV: Constant Velocity) 모델을 사용하는 EKF를 기반으로 본 논문에서는 위치추정 필터를 구성한다. 먼저 CV 모델에서 추정하고자 하는 변수는 위치와 속도로 2-D 상의 위치와 속도를 다음과 같이 정의한다.

$$X_k = [x_k \quad \dot{x}_k \quad y_k \quad \dot{y}_k]^T \quad (18)$$

이를 기반으로 위치와 속도는 다음과 같이 시간전파(time-propagation)된다.

$$x_k^- = x_{k-1} + \dot{x}_{k-1} \cdot T \quad (19a)$$

$$\dot{x}_k^- = \dot{x}_{k-1} \quad (19b)$$

$$y_k^- = y_{k-1} + \dot{y}_{k-1} \cdot T \quad (19c)$$

$$\dot{y}_k^- = \dot{y}_{k-1} \quad (19d)$$

여기서  $T$ 는 위치추정 주기로 RSSI 측정치 획득 주기와 동일하다.

EKF를 위한 오차 상태변수 기반 시스템 모델은 다음과 같다[12].

$$\delta X_{k+1} = F \delta X_k + w_k$$

$$\Leftrightarrow \begin{bmatrix} \delta x_{k+1} \\ \delta \dot{x}_{k+1} \\ \delta y_{k+1} \\ \delta \dot{y}_{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & T & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta x_k \\ \delta \dot{x}_k \\ \delta y_k \\ \delta \dot{y}_k \end{bmatrix} + w_k, w_k \sim N(0, Q) \quad (20)$$

그리고 측정치 모델은 (15)를 참조하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$z_k = H_k \delta X_k + v_k, v_k \sim N(0, R)$$

$$\Leftrightarrow \begin{bmatrix} \tilde{r}_k^1 - \hat{r}_k^1 \\ \vdots \\ \tilde{r}_k^m - \hat{r}_k^m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{x^1 - \hat{x}_k}{\hat{r}_k^1} & 0 & -\frac{y^1 - \hat{y}_k}{\hat{r}_k^1} & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -\frac{x^m - \hat{x}_k}{\hat{r}_k^m} & 0 & -\frac{y^m - \hat{y}_k}{\hat{r}_k^m} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta x_k \\ \delta \dot{x}_k \\ \delta y_k \\ \delta \dot{y}_k \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$+ \begin{bmatrix} \delta r_k^1(v) \\ \vdots \\ \delta r_k^m(v) \end{bmatrix}$$

여기서  $m$ 은 RSSI 측정치의 수를 의미한다.

RSSI 측정치 획득 주기로 (19)를 기반으로 위치와 속도를 시간전파 한 다음 RSSI 측정치를 획득한 후 다음과 같이 상태변수와 상태변수 오차 공분산 행렬의 측정치 갱신을 수행한다[14].

$$\hat{X}_k = \hat{X}_k^- + K_k \delta z_k \quad (22)$$

$$P_k = (I_{4 \times 4} - K_k H_k) P_k^- \quad (23)$$

여기서

$$K_k = P_k^- H_k^T (H_k P_k^- H_k^T + R)^{-1} \quad (24)$$

$$P_k^- = F P_{k-1}^- F^T + Q \quad (25)$$

그리고 잔차는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\delta z_k = z_k - H_k \delta X_k^- \quad (26)$$

EKF에서는 추정된 오차 상태변수를 (22)와 같이 상태변수에 더하게 되므로 오차 상태변수는 시간전파 하지 않으며  $\delta X_k^-$ 는 0이 된다. 따라서 (26)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \delta z_k &= z_k \\ &= [\tilde{r}_k^1 \ \dots \ \tilde{r}_k^m]^T - [\hat{r}_k^1 \ \dots \ \hat{r}_k^m]^T \end{aligned} \quad (27)$$

여기서

$$\hat{r}_k^j = \sqrt{(x^j - \hat{x}_k)^2 + (y^j - \hat{y}_k)^2} \quad (28)$$

즉 EKF에서 잔차는 RSSI 측정치와 측정치 추정치의 차이이며 (14)를 통해 위치추정 오차, IARM 오차 그리고 백색잡음에 의해 발생하는 거리 계산오차로 이루어지는 것을 알 수 있다. 따라서 (27)을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \delta z_k &= \begin{bmatrix} \delta r_k^1(\delta \hat{P}) \\ \dots \\ \delta r_k^m(\delta \hat{P}) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \delta r_k^1(\delta S) \\ \dots \\ \delta r_k^m(\delta S) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \delta r_k^1(v) \\ \dots \\ \delta r_k^m(v) \end{bmatrix} \\ &\equiv \delta R(\delta \hat{P}) + \delta R(\delta S) + \delta R(v) \end{aligned} \quad (29)$$

이 식을 통해 IARM 오차를 다음과 같이 추정할 수 있다.

$$\delta \hat{R}(\delta S) = E[\delta z_k] - E[\delta R(\delta \hat{P})] - E[\delta R(v)] \quad (30)$$

이 식에서  $E[\delta R(v)] = 0$  이며  $E[\delta R(\delta \hat{P})]$  는 필터가 완전 가관측한 경우 측정치 갱신에 따라 점차 0으로 수렴할 수 있음을 가정한다. CV 모델 기반 필터는 완전 가관측 하다. 그러나 초기 위치추정 오차가 큰 경우  $E[\delta R(\delta \hat{P})]$  은 0이 아니므로 추정된 IARM 오차에는 해당 오차가 포함되게 된다. 이 영향은 시험 분석을 통해 확인한다. (2)에서 IARM 오차는 항상 양의 실수이므로 (30)은 다음과 같이 정리된다.

$$\delta \hat{R}(\delta S) = |\delta z_k| \quad (31)$$

이를 기반으로 필터의 측정치 갱신 전에 잔차를 다음과 같이 수정한다.

$$\begin{aligned} \delta \tilde{z}_k &= \delta z_k - \delta \hat{R}(\delta S) \\ &= \delta R(\delta \hat{P}) + (\delta R(\delta S) - \delta \hat{R}(\delta S)) + \delta R(v) \\ &\approx \delta R(\delta \hat{P}) + \delta R(v) \end{aligned} \quad (32)$$

즉 (22)는 다음과 같이 수정하여 사용한다.

$$\begin{aligned} \hat{X}_k &= \hat{X}_k^- + K_k \delta \tilde{z}_k \\ &= \hat{X}_k^- + K_k (\delta z_k - |\delta z_k|) \\ &= \hat{X}_k^- + K_k \left( \begin{bmatrix} \tilde{r}_k^1 - \hat{r}_k^1 \\ \vdots \\ \tilde{r}_k^m - \hat{r}_k^m \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \tilde{r}_k^1 - \hat{r}_k^1 \\ \vdots \\ \tilde{r}_k^m - \hat{r}_k^m \end{bmatrix} \right) \end{aligned} \quad (33)$$

수정된 잔차 기반의 EKF를 통해 실내의 벽 및 구조물에 의한 투과와 다중경로 및 NLOS 신호에 의하여 발생하는 IARM 오차를 최소화 한 위치추정을 할 수 있게 된다.

#### IV. 시험 분석

제안된 수정된 잔차 기반 EKF를 이용한 와이파이 기반 실내위치추정의 성능을 분석하기 위하여 실 시험을 수행하고 그 결과를 분석하였다. 시험 환경은 그림 1과 같이 12개의

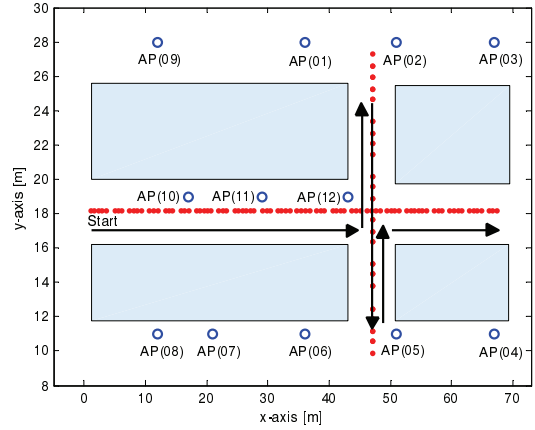


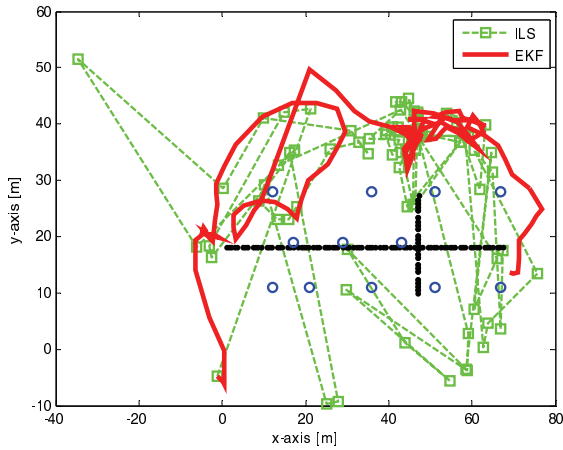
그림 1. 시험 환경과 궤적.

Fig. 1. Experimental environment and trajectory.

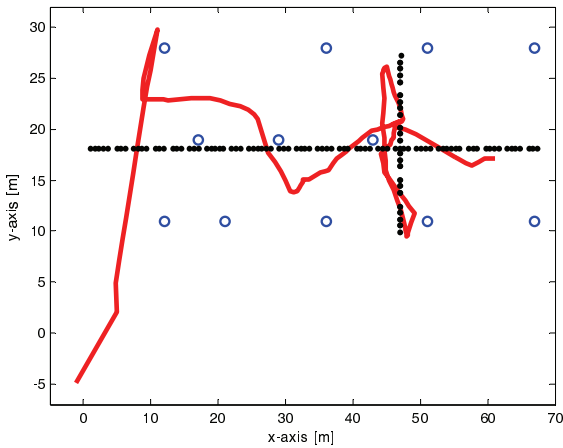
AP가 설치되어 있는 실내 공간이다. 환경은 사무실이며 보행 경로는 통로이다. 보행 경로 이외의 블록으로 표시된 부분은 다양한 파티션과 가구들로 채워져 있다. RSSI 정보 획득 시 -80 [dBm] 이상의 신호만 사용하는 것으로 하며 그 결과 시험 궤적 상에서 평균 사용되는 AP의 수는 7.19개가 된다. RSSI 정보 획득 문턱값(threshold)를 높이면 거리 대비 RSSI 정보의 정확도는 높일 수 있으나 연결 AP의 수가 떨어져 위치추정 정확도가 떨어질 수 있다. 스마트폰에 와이파이 RSSI 정보 획득 및 저장 소프트웨어를 탑재하고 보행자가 화살표로 나타낸 것과 같은 궤적으로 약 1 [m/s]의 속도로 보행하였다. 초기 위치추정 오차에 의한 영향을 분석하기 위해 case I에서는 초기 위치를 ILS의 결과를 사용하였으며 case II에서는 정확한 위치로 임의로 설정하였다. 본 논문에서 제시하는 IARM 오차 감소 기능(IEM: IARM Error Mitigated)을 갖는 EKF를 ILS와 일반 EKF와 비교 분석 하였다.

그림 2와 그림 3은 각각 case I과 case II의 시험 결과를 나타낸 것이다. ILS의 결과는 그림 2(a)에 나타내었다. 그리고 각 그림에서 (a)와 (b)는 각각 EKF와 본 논문에서 제시하는 IEM EKF의 위치추정 결과를 나타낸 것이다. (c)는 오차 확률을 나타낸 것이며 (d)-(f)는 거리로 환산한 IARM 오차(점선)와 추정치(실선)를 나타낸 것이다. 먼저 그림 2(a)에서 나타낸 ILS는 보행자의 보행경로를 전혀 알 수 없는 위치추정 결과를 산출하는 것을 알 수 있다. 그 이유는 그림 (d)-(f)에서 볼 수 있듯이 RSSI 정보 획득을 위한 신호 세기 문턱값 이내의 신호에서 IARM 오차가 매우 크게 발생하며 이 오차가 위치추정에 그대로 반영되기 때문이다. 즉 실내 공간에서 IARM 오차를 그대로 노출시키는 경우 ILS 방법으로는 와이파이 RSSI 기반으로 위치기반서비스(LBS: Location Based Service)용 보행자의 위치정보를 제공하기 어렵다. 그림 2(a)와 그림 3(a)에서 각각 나타낸 EKF의 결과는 ILS 방법에 비해 보행자의 이동 경로의 양상은 보이지만 오차가 큰 것을 알 수 있다. 보행자의 보행 동적 모델을 사용하는 EKF에서도 IARM 오차를 보상하지 않는 경우 초기 위치추정 오차의 크기에 관계 없이 측정치에 의존적으로 큰 오차를 유발하는 것을 확인하였다. 그림 2(b)와 그림 3(b)는 본 논문에서 제시하는 IEM EKF의 위치추정 결과를 나타낸 것이다. 초기 위치추정 오차

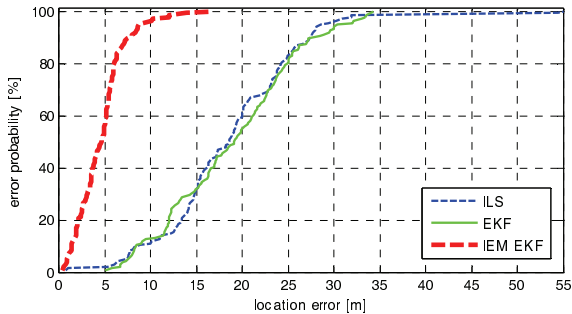




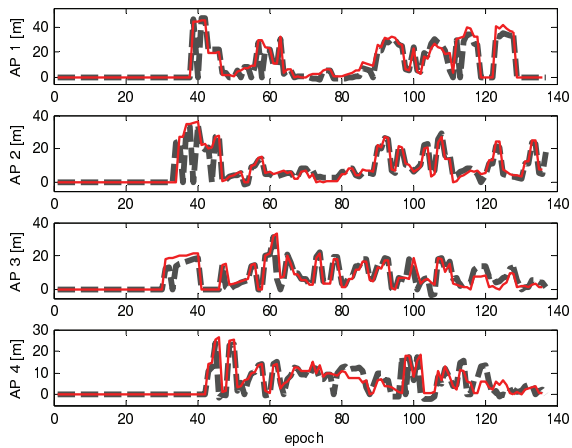
(a) ILS & EKF.



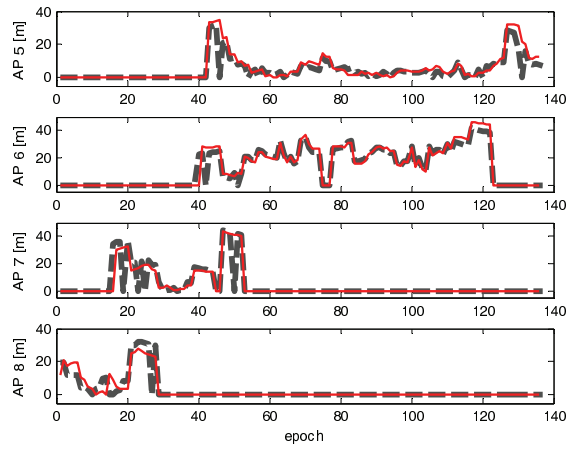
(b) IEM EKF.



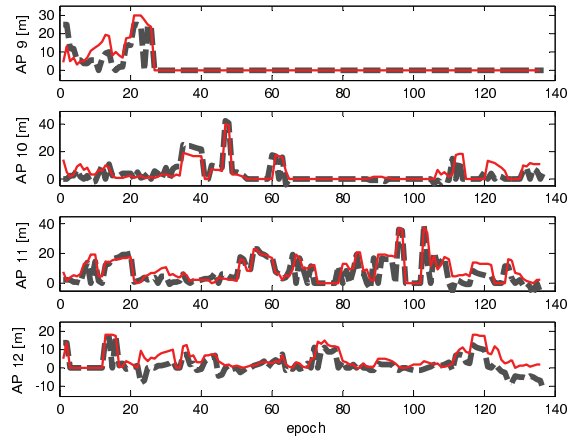
(c) Error probability.



(d) IARM estimates (AP 1 - AP 4).



(e) IARM estimates (AP 5 - AP 8).



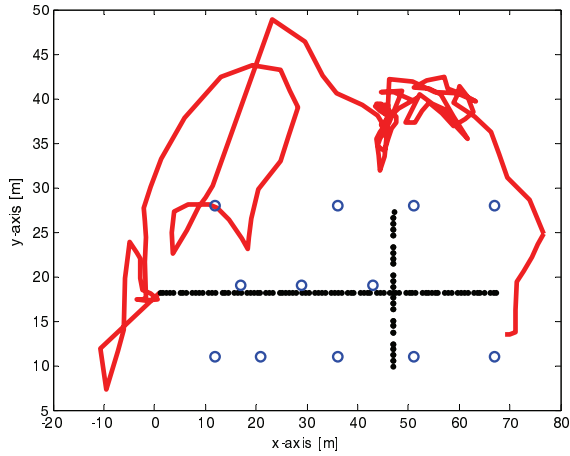
(f) IARM estimates (AP 9 - AP 12).

그림 2. 시험 결과 (case I).

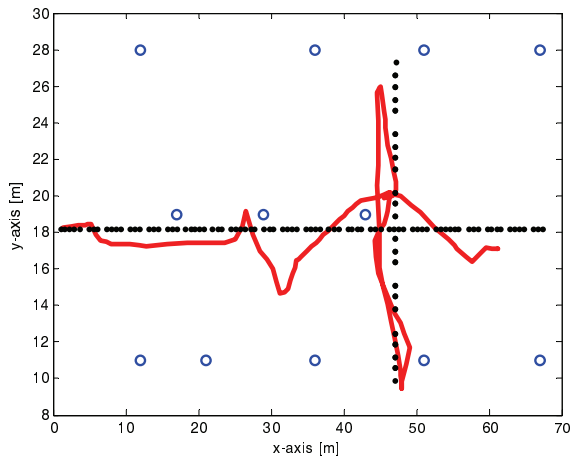
Fig. 2. Experimental results (case I).

가 큰 경우 초기에는 추정오차가 크지만 점점 본 궤적으로 수렴하게 되는 것을 알 수 있으며 초기 위치추정 오차가 작은 경우에는 처음부터 보행자의 보행 궤적에 유사한 위치를 추정하는 것을 알 수 있다. 특히 교차로 부분에서 보행 방향 및 이동 경로를 매우 정확하게 추정하는 것을 통해 제안된 방법의 우수함을 알 수 있다. 그림 (d)-(f)에서 제안된 필터의 간차를 통해 추정된 IARM 오차의 정확도가 높은 것을 알 수 있다. 또한 채널 별 IARM 오차를 추정함으로써 선택적 AP 기반 위치추정의 정확도도 향상할 수 있음을 알 수 있다. 그림 (c)와 표 1에서 나타난 추정오차 결과를 통해 case I의 경우 ILS 대비 IEM EKF의 위치추정 오차는 평균 24.4308%이며 case II의 경우 평균 18.6435%가 되는 것을 알 수 있으며 IARM 추정치 또한 매우 정확한 것을 확인할 수 있다.

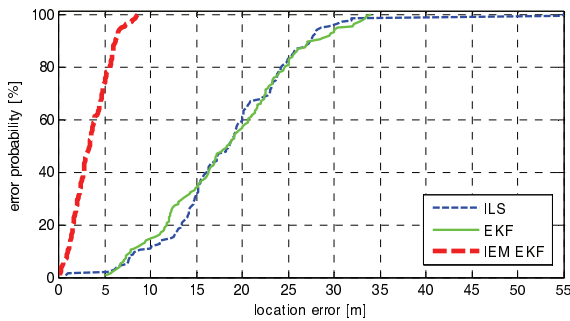
그림 4는 초기 위치 오차 별 시간에 따른 필터의 위치 추정 오차를 나타낸 것이다. 이 그림을 통해 초기 위치 오차가 크더라도 필터가 가관측하므로 20초 이내에 추정 오차가 필터가 수렴할 수 있는 수준으로 수렴하는 것을 볼 수 있다. 따라서 식 (31)에서 제시한 IARM 오차 추정 기법의 신뢰성을 확인할 수 있다. 본 시험 결과를 통해 IARM 오차가 큰 실내 환경에서 와이파이 RSSI 정보만으로도 IEM EKF를 통해 정확한 보행자의 이동 경로를 추정할 수 있음을 결론 내릴 수 있다.



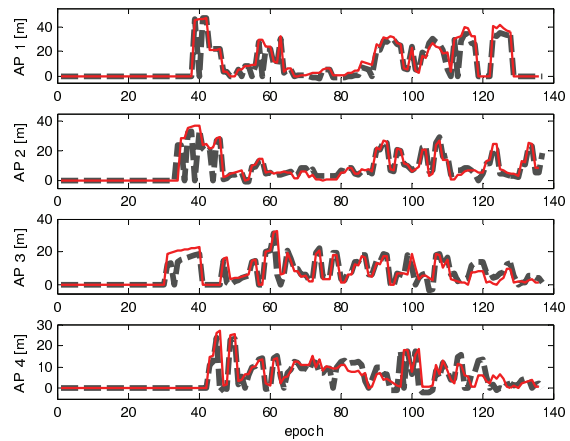
(a) EKF.



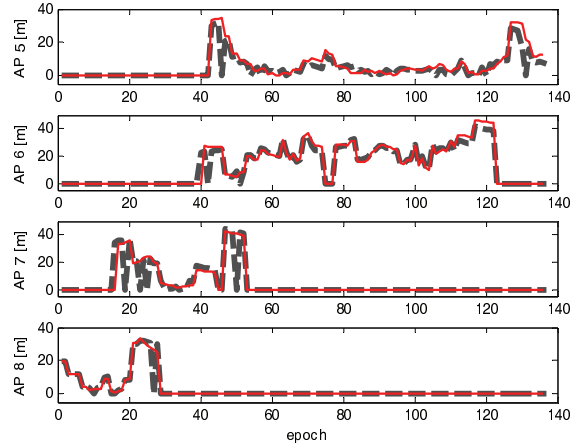
(b) IEM EKF.



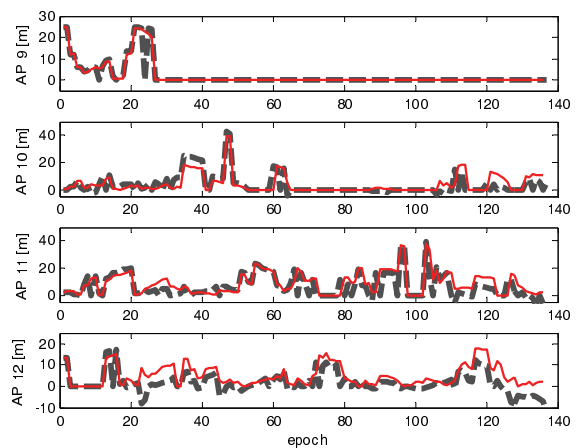
(c) Error probability.



(d) IARM estimates (AP 1 - AP 4).



(e) IARM estimates (AP 5 - AP 8).



(f) IARM estimates (AP 9 - AP 12).

그림 3. 시험 결과 (case II).

Fig. 3. Experimental results (case II).

표 1. 시뮬레이션 결과 - 추정오차.

Table 1. Simulation results - estimation error.

		ILS	EKF	IEM EKF	IEM Estimation Error
case I	Mean [m]	18.7411	18.8429	4.5786	2.2745
	S. D. [m]	7.8524	7.1072	2.6902	4.2869
case II	Mean [m]	18.7411	18.3785	3.4940	2.0975
	S. D. [m]	7.8524	7.2611	2.0527	4.2201

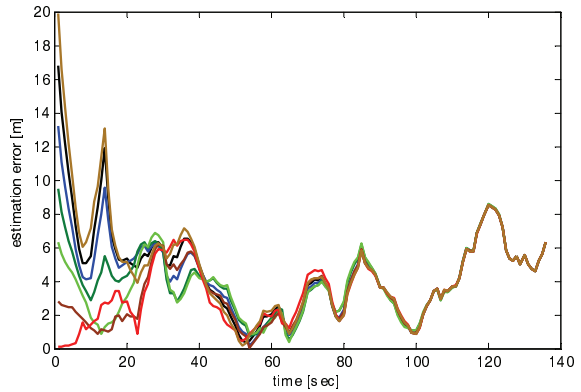


그림 4. 초기 위치 오차 별 추정 오차.

Fig. 4. Estimation errors with the initial location error.

## V. 결론

본 논문에서는 와이파이 RSSI 측정치 기반 보행자 위치추정의 정확도를 향상시키기 위해 수정된 잔차 기반 EKF를 제시하고 시험 분석을 통해 제안된 기법의 타당성과 성능의 우수함을 보인다. 와이파이 RSSI 측정치를 전파전달 모델 기반으로 거리정보로 환산한 다음 거리정보 및 AP 위치정보를 사용하여 삼변측량법 기반으로 추정된 위치는 실내 환경에서 IARM 오차로 인해 큰 위치추정 오차를 유발하게 된다. 이 문제를 해결하기 위해 본 논문에서는 단일 CV 모델 기반의 EKF를 사용하여 위치를 추정하며 이때 필터 잔차의 절대값을 취하여 IARM 오차를 추정함으로써 IARM 오차에 의한 영향을 최소화 한 정확한 위치추정을 가능하게 한다. 시험 분석을 통해 실내 공간에서 발생하는 IARM 오차를 제안된 IEM EKF를 통해 매우 정확하게 추정하며 이를 반영하여 추정된 위치정보 또한 그 정확도가 초기 위치추정 정확도가 높은 경우 ILS 방법 대비 평균 18.6435% 이내가 됨을 보인다. 제안된 IEM EKF는 최근 관심이 크게 증가하고 있는 와이파이 기반 실내위치 추정의 정확도를 크게 향상시킬 수 있으며 이를 통해 다양한 LBS를 위한 보행자의 위치정보를 높은 신뢰도와 정확도를 갖고 제공할 수 있음을 기대할 수 있게 되었다.

## REFERENCES

- [1] K. W. Kolodziej and J. Hjelm, *Local Positioning Systems: LBS Applications and Services*, Taylor & Francis Group, 2006.
- [2] M. Hazas, J. Scott, and J. Krumm, "Location-aware computing comes of age," *IEEE Computer*, vol. 37, no. 2, pp. 95-97, 2004.
- [3] 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, Oct. 2005.
- [4] M. Enkhtur and S. Y. Cho, "Positioning fingerprint DB construction and efficient DB update based on signal propagation feature map," *Telecommunications Review (in Korean)*, vol. 20, no. 6, pp. 1017-1030, Dec. 2010.
- [5] S. Y. Cho and J. G. park, "Radio propagation model and spatial correlation method-based efficient database construction for positioning fingerprints," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 20, no. 7, pp. 774-781, Jul. 2014.
- [6] 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.
- [7] A. S. Kim, J. G. Hwang, and J. G. Park, "Enhanced indoor positioning algorithm using WLAN RSSI measurements considering the relative position information of AP configuration," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 19, no. 2, pp. 146-151, Feb. 2013.
- [8] H. S. Kim, J. Y. Shim, W. S. Choi, and H. K. Lee, "A location technique based on calibrated radio frequency propagation model for wireless local area networks," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 14, no. 8, pp. 760-766, Aug. 2008.
- [9] J. B. Andersen, T. S. Rappaport, and S. Yoshida, "Propagation measurements and models for wireless communications

channels," *IEEE Communications Magazine*, vol. 33, no. 1, pp. 42-49, Jan. 1995.

- [10] S. Y. Cho, "Hybrid closed-form solution for wireless localization with range measurements," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 19, no. 7, pp. 633-639, Jul. 2013.
- [11] S. Y. Cho and B. D. Kim, "Linear closed-form solution for wireless localization based on difference of squared range measurements," *IET-Wireless Sensor Systems*, vol. 3, no. 4, pp. 255-265, Dec. 2013.
- [12] X. Li and V. Jilkov, "Survey of maneuvering target tracking. Part I: dynamic models," *IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems*, vol. 39, no. 4, pp. 1333-1364, Oct. 2003.
- [13] W. P. L. Cully, S. L. Cotton, W. G. Scanlon, and J. B. McQuiston, "Body shadowing mitigation using differentiated LOS/NLOS channel models for RSSI-based Monte Carlo personnel localization," in *Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2012 IEEE*, pp. 694-698, 2012.
- [14] R. G. Brown and P. Y. C. Hwang, *Introduction to Random Signals and Applied Kalman Filtering*, John Wiley & Sons, 1985.
- [15] Y. Bar-Shalom, S. Challa, and H. A. P. Blom, "IMM estimator versus optimal estimator for hybrid systems," *IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems*, vol. 41, no. 3, pp. 986-991, Mar. 2005.



조성윤

1998년 광운대학교 제어계측공학과 졸업. 2000년 동 대학원 졸업(공학석사). 2004년 동 대학원 졸업(공학박사). 2004년 서울대학교 기계항공공학부 BK21 박사후연구원. 2004년 9월~2013년 8월 한국전자통신연구원(ETRI) 선임연구원. 2008년 3월~2013년 2월 과학기술연합대학원대학교 겸임교수. 2013년 9월~현재 경일대학교 로봇융용학과 조교수. 관심분야는 항법기술(INS/GPS/Vision/Map 결합항법기술, PDR, WSN 및 무선위치추정기술, 로봇항법기술), MEMS 센서 응용, 선형/비선형 필터 설계, ITS/Telematics/LBS.