

# CSS WPAN에서 주파수 편이를 보상하는 확장 Kalman 필터를 사용한 이동노드의 위치추정 방식

남 윤 석\*

요 약

WPAN에서 위치추정은 UWB를 사용한 선택적 기능으로 규격화되어 있다. 그러나 실제로는 위치추정 기능이 제공되고, 가격이 저렴하고 개발환경이 제공되고 있는 CSS(Chirp Spread Spectrum) 소자를 주로 사용하고 있다. CSS 소자는 2.4GHz 주파수 대역을 사용하고, 표본화 클럭 주파수가 UWB에 비하여 낮고, 시간정보추출 정확도가 떨어지므로 거리추정 오차가 크게 나타난다. 거리추정 오차는 SDS-TWR 방식을 사용하여 10m 거리에서 30cm~1m 정도로 알려지고 있으며, (10m x 10m) 환경에서 위치추정 오차는 1~2m 정도로 알려지고 있다. 따라서 보다 개선된 성능이 요구되는 응용을 위해서는 거리추정 이후의 후처리 알고리즘 개발이 중요하게 되었다. 본 논문에서는 고정노드의 주파수편이를 확장 Kalman 필터에 적용하는 방식을 연구하였으며, 각 고정노드의 주파수 편이를 공통의 상태변수와 각 고정노드별 주파수편이 상수로 구분하고 이를 통합하는 주파수편이 보상 확장 Kalman 필터 방식을 제안하였다. 제안된 방식은 CSS WPAN 노드를 사용하여 10cm 이하로 매우 정확한 위치오차 범위 내에서도 이동노드의 위치를 추정할 수 있음을 확인하였다.

키워드 : 무선개인영역망, 위치추정, 비동기 거리추정, 주파수편이, 확장칼만필터

## Location Estimation Method using Extended Kalman Filter with Frequency Offsets in CSS WPAN

Yoon-Seok Nam\*

ABSTRACT

The function of location estimation in WPAN has been studied and specified on the ultra wide band optionally. But the devices based on CSS(Chirp Spread Spectrum) specification has been used widely in the market because of its functionality, cheapness and support of development. As the CSS device uses 2.4GHz for a carrier frequency and the sampling frequency is lower than that of the UWB, the resolution of a timestamp is very coarse. Then actually the error of a measured distance is very large about 30cm~1m at 10 m depart. And the location error in (10m x 10m) environment is known as about 1m~2m. So for some applications which require more accurate location information, it is very natural and important to develop a sophisticated post processing algorithm after distance measurements. In this paper, we have studied extended Kalman filter with the frequency offsets of anchor nodes, and proposed a novel algorithm frequency offset compensated extended Kalman filter. The frequency offsets are composed with a variable as a common frequency offset and constants as individual frequency offsets. The proposed algorithm shows that the accurate location estimation, less than 10cm distance error, with CSS WPAN nodes is possible practically.

Keywords : Wireless Personal Area Network, Location Estimation, Asynchronous Ranging, Frequency Offset, Extended Kalman Filter

### 1. 서 론

최근 서비스 중인 측위 기술은 대부분 GPS(Global Positioning Service)를 기반으로 다양한 분야의 Navigation에 사용되고 있으며, 스마트폰 등에서는 이동통신 분야와 GPS 기술을 활용하여 다양한 응용이 서비스되고 있다. 그러나, GPS를 활용하기 어려운 주변 환경 또는 망 환경에서는 다른 수단을 사용하여 이동노드의 위치를 추정하는

\* 이 논문은 2010년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No.2010-0023675).

† 종신회원 : 동국대학교 경주캠퍼스 정보통신공학부 교수  
논문접수 : 2012년 3월 22일  
수정일 : 1차 2012년 6월 7일  
심사완료 : 2012년 7월 19일

\* Corresponding Author : Yoon-Seok Nam(ysnam@dongguk.ac.kr)

연구가 진행되고 있다. WPAN(Wireless Personal Area Network) 기술은 홈 네트워크, 센서네트워크 등 산업 전 분야에 적용되고 있는 중요한 기술이며, 이동노드의 위치정보를 제공하기 위한 연구가 오래전부터 진행되어 왔다. 저속 WPAN에서는 IEEE 802.15.4-2003 이후 IEEE802.15.4a 및 IEEE802.15.4b에서 각각 대체 PHY 및 PHY/MAC 기능개선 측면에서 연구가 진행되었으며, 특히 IEEE802.15.4a[1]에서는 거리추정 기술과 데이터 전송속도 등을 포함한 물리계층 기능 개선 표준기술이 연구되었다. 고속 WPAN에서는 WiMedia Alliance[2]의 PHY 규격에 IEEE802.15.4a와 동일한 방식으로 TOF(Time of Flight)를 정확하게 추정할 수 있는 물리계층 기능이 정의되었다. TOF 추정은 주로 비동기 양방향 통신으로부터 시각 동기 정보를 교환함으로써 얻어진다[3]. 실내측위 연구분야에서 다중경로의 영향을 최소화하기 위하여 신호의 폭이 좁은 UWB(Ultra Wide Band) 주파수 신호를 사용한다. WLAN(Wireless local Area Network)에서는 위치추정 연구 초기에는 Microsoft사의 RADAR[10] 시스템 등과 같이 RSSI(Received Signal Strength Indication)를 사용하였으나, 최근 IEEE802.11v[3]에서는 비동기양방향거리추정방식을 사용하도록 규격이 완료되었다.

IEEE802.15.4a에서는 CSS(Chirp Spread Spectrum)와 UWB 기술 등을 추가로 포함하고, UWB를 사용한 거리추정 기술을 선택기능으로 규정하였다. UWB 기반에서는 두 단말 간에 동기화 동작 없이 송신 및 수신 시각을 측정하여 거리를 추정하는 양방향거리추정방식(Two Way Ranging : TWR)과 대칭양방향거리추정방식(Symmetric Double Sided TWR : SDS-TWR)[4]을 사용한다. 저속 및 고속 WPAN 기술 기반에서 TWR 또는 SDS-TWR 방식의 주파수편이에 의한 오류를 줄이는 연구들이 있었으며[5], Timestamp를 읽어서 단방향거리를 추정하는 연구[6]도 있었다. 그러나 표준 기술을 준수하는 UWB 소자 보다 먼저 CSS 기술을 사용한 소자가 거리추정 기능을 포함하여 저렴하게 제공되면서 저속 WPAN에서의 위치추정 무선기술로 미리 자리 잡았다. 그러나, 두 노드 간의 거리가 10m인 상태에서 SDS-TWR 방식을 사용하여 거리추정 오차 30cm 이상, 그리고 (10m x 10m) 환경에서 위치추정오차가 1m 이상 등으로 보다 정확한 위치정보를 요구하는 응용에 사용하기 어려웠다[7, 8]. CSS 소자를 활용하는 조건에서 위치정보 추정 성능을 개선하기 위해서는 거리추정 이후의 후처리 알고리즘 개발에 관심을 두어야 하며, Kalman 필터 등이 사용되고 있다. 기존의 Kalman 필터를 적용하여 CSS 거리추정에 포함된 오차를 Bias로 판단하고, 이 Bias 오차를 제거하는데 확장 Kalman 필터(Extended Kalman Filter : EKF)에 좌표 이외의 Bias 상태변수를 추가하는 방식으로 (10m x 10m) 환경에서 20cm 내외의 거리오차로 획기적으로 개선시켰다[9]. 그러나, 추가한 변수에 대한 이론적 근거로 CSS 소자의 거리추정 특성이 거리에 비례하는 오차를 포함하고 있다는 실험데이터를 기반으로 설정되었다. TWR 및 SDS-TWR 방식의 거리추정 오차는 규격에 기술된 바와 같이 노드간의

주파수편이에 기인하는 바, 공통 상태변수에 대한 해석은 주파수편이로 분석되는 것이 타당할 것이다. 따라서 각 고정보드별로 발생하는 주파수편이를 고려함으로써 이론적인 근거와 추가적인 개선의 여지가 도출 될 수 있을 것으로 기대되었다.

본 논문에서는 CSS 기술의 상용 노드를 사용하여 이동노드의 위치를 정확하게 추정하고자 연구하였으며, 먼저 기존 논문에서 확장 Kalman 필터에 추가된 변수에 대한 근거를 제시하였으며, 각 노드별 주파수 편이를 추가함으로써 성능을 개선이 가능함을 확인하였다. 본 논문은 2장에서 기존의 위치추정에 사용된 확장 Kalman 필터를 소개하고, 주파수 편이 관점에서 추가된 상태변수를 해석하였으며, 3장에서 각 고정보드별 주파수 편이를 고려한 알고리즘을 제안하였으며, 4장에서 실험을 통하여 제안된 방식의 성능을 평가 분석하고, 마지막으로 앞으로의 연구방향에 대한 내용으로 구성하였다.

## 2. 위치추정 확장 Kalman 필터

### 2.1 확장 Kalman 필터

Kalman 필터는 알고 있는 신호의 통계적 특성을 활용하여 측정된 값으로부터 상태를 추정하는 적응적 디지털 필터이다. 일반적인 Kalman 필터는 선형시스템에 적용하고, 확장 Kalman 필터는 비선형시스템에 적용한다. 이동노드의 위치는 지속적으로 추정되는 상태로 정의할 수 있으며, 따라서 CSS 노드로부터 얻어지는 측정거리는 이동노드의 위치와 비선형이므로 이동노드의 위치추정은 확장 Kalman 필터에 적용할 수 있다. 먼저 비선형상태방정식을 다음과 같이 정의한다.

$$x_{i+1} = f_i(x_i, w_i) \quad (1)$$

$$y_i = h_i(x_i, v_i) \quad (2)$$

여기에서  $x_i$ 는 상태벡터(state vector),  $y_i$ 는 관측벡터(measurement vector),  $w_i$ 는 프로세서잡음벡터(process noise vector),  $v_i$ 는 관측잡음벡터(measurement noise vector)이고,  $f_i(\cdot)$ 는 비선형 천이행렬(transition matrix) 함수,  $h_i(\cdot)$ 는 비선형 관측행렬(measurement matrix) 함수이다. 프로세서잡음과 관측잡음의 상관행렬(correlation matrix)는 각각 다음과 같다.

$$Q_i = E[w_i w_i^T] \quad (3)$$

$$R_i = E[v_i v_i^T] \quad (4)$$

실제상태와 추정상태 간의 추정오차의 상관행렬은 다음과 같다.

$$P_{\hat{x}_{i|i-1}} = E[\tilde{x}_{\hat{x}_{i|i-1}} \tilde{x}_{\hat{x}_{i|i-1}}^T] \quad (5)$$

여기에서  $\tilde{x}_{\hat{x}_{i|i-1}} = x_i - \hat{x}_{\hat{x}_{i|i-1}}$

$\hat{x}_{\hat{x}_{i|i-1}}$  : estimated state

Kalman 필터 반복은 초기값  $x_{10}$ ,  $P_{10}$ 로부터 시작한다. 반복은 다음 수식과 같이 실행된다.

$$e_i = y_i - h_i(\hat{x}_{\hat{x}_{i|i-1}}, 0) \quad (6)$$

$$K_i = P_{\hat{x}_{i|i-1}} H_i^T [H_i P_{\hat{x}_{i|i-1}} H_i^T + R_i]^{-1} \quad (7)$$

여기에서,  $h_i(x_i, v_i)$ 의 자코비안행렬(Jacobian matrix)는

$$H_i = \left. \frac{\partial h_i(x_i, v_i)}{\partial x_i} \right|_{x_i = \hat{x}_{\hat{x}_{i|i-1}}} \quad (8)$$

$$\hat{x}_{\hat{x}_{i|i}} = \hat{x}_{\hat{x}_{i|i-1}} + K_i e_i \quad (8)$$

$$\hat{x}_{\hat{x}_{i+1|i}} = f_i(\hat{x}_{\hat{x}_{i|i}}, 0) \quad (9)$$

$$P_i = P_{\hat{x}_{i|i}} = [I - K_i H_i] P_{\hat{x}_{i|i-1}} \quad (10)$$

$$P_{\hat{x}_{i+1|i}} = F_i P_i F_i^T + Q_i \quad (11)$$

여기에서,  $f_i(x_i, w_i)$ 의 자코비안행렬은

$$F_i = \left. \frac{\partial f_i(x_i, w_i)}{\partial x_i} \right|_{x_i = \hat{x}_{\hat{x}_{i|i}}}$$

## 2.2 위치추정 확장 Kalman 필터 모델

고정노드는 미리 알고 있는 위치에 설치된다. 고정노드 수는 4개, 실험공간을 2차원 좌표로 가정하면,  $i$  시각에서 이동노드의 위치  $x_i$ 와  $k$ 번째 고정노드의 좌표  $a_k$ 를 다음과 같이 각각 표현할 수 있다.

$$x_i = [x_1(i) \ x_2(i)]^T \equiv \begin{bmatrix} x_1(i) \\ x_2(i) \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$a_k = [a_{k1} \ a_{k2}]^T \equiv \begin{bmatrix} a_{k1} \\ a_{k2} \end{bmatrix} \quad (13)$$

따라서 순간  $i$ 에서  $k$ 번째 고정노드와 이동노드간의 거리  $d_k(i)$ 와  $d_i(x_i)$ 는 다음과 같은 관계가 있다.

$$d_k(i) = \sqrt{(x_1(i) - a_{k1})^2 + (x_2(i) - a_{k2})^2} \quad (14)$$

$$d_i(x_i) = \begin{bmatrix} d_1(i) \\ d_2(i) \\ d_3(i) \\ d_4(i) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{(x_1(i) - a_{11})^2 + (x_2(i) - a_{12})^2} \\ \sqrt{(x_1(i) - a_{21})^2 + (x_2(i) - a_{22})^2} \\ \sqrt{(x_1(i) - a_{31})^2 + (x_2(i) - a_{32})^2} \\ \sqrt{(x_1(i) - a_{41})^2 + (x_2(i) - a_{42})^2} \end{bmatrix}$$

순간  $i$ 에서 측정되는 거리를 포함하는 관측벡터  $y_i$ 과 관측벡터방정식의 자코비안행렬  $H_i$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$y_i = \begin{bmatrix} y_1(i) \\ y_2(i) \\ y_3(i) \\ y_4(i) \end{bmatrix} = h_i(x_i, v_i) \quad (15)$$

$$= d_i(x_i) + v_i = \begin{bmatrix} d_1(i) \\ d_2(i) \\ d_3(i) \\ d_4(i) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_1(i) \\ v_2(i) \\ v_3(i) \\ v_4(i) \end{bmatrix}$$

$$H_i = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{21} & H_{22} \\ H_{31} & H_{32} \\ H_{41} & H_{42} \end{bmatrix} \quad (16)$$

여기에서,

$$H_{kj}(i) = \left\{ \frac{\hat{x}_j(i|i-1) - a_{kj}}{\|x_{\hat{x}_{i|i-1}} - a_k\|_2} \right\}_{kj}$$

이동노드가 거의 움직이지 않는다고 가정하면, 프로세서 벡터방정식과 프로세서벡터방정식의 자코비안행렬은 다음과 같이 표현된다.

$$x_{i+1} = f_i(x_i, w_i) = x_i + w_i \quad (17)$$

$$= \begin{bmatrix} x_1(i) \\ x_2(i) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} w_1(i) \\ w_2(i) \end{bmatrix}$$

$$F_i = \left. \frac{\partial f_i(x_i, w_i)}{\partial x_i} \right|_{x_i = \hat{x}_{\hat{x}_{i|i}}} = I \quad (18)$$

$$F_i = \begin{bmatrix} F_{11} & F_{12} \\ F_{21} & F_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1(x_i, 0)}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1(x_i, 0)}{\partial x_2} \\ \frac{\partial f_2(x_i, 0)}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2(x_i, 0)}{\partial x_2} \end{bmatrix}$$

## 2.3 주파수편이를 반영한 확장 Kalman 필터 모델

주파수편이는 각각의 노드에 장착된 발진기에 의하여 절대적인 값으로 존재한다. 위치추정에서는 주파수편이를 상대적 주파수편이로 노드 쌍에 대하여 처리할 수도 있다. 하나의 고정노드와 이동노드 간에 존재하는 절대 주파수 편이는 2개이고, 상대주파수편이는 1개로 설정 가능하다. 이러한

주파수편이에 따른 거리오차를 줄이기 위하여 TWR 보다는 SDS-TWR을 사용하게 된다. 나아가 주파수편이를 알고 이를 저속 및 고속 WPAN의 TWR 및 SDS-TWR 방식에 적용함으로써 이동노드의 위치추정을 보다 정확하게 얻을 수 있으며[8,9], 주파수편이를 이용하여 망 동기에 적용하면 단방향거리추정에도 활용할 수 있다[10]. 이와 같이 주파수 편이는 위치추정 오차에 영향이 크게 미치지 때문에 확장 Kalman 필터에 상태변수로 적용하기에 충분하다.

주파수편이를 확장 Kalman 필터의 상태에 반영하기 위하여 이동노드의 2차원 좌표와 각 고정노드와 이동노드 쌍에 의한 각각의 주파수편이를 상태에 포함시켜 모델링할 수 있다. 가장 단순하게 정리하면 다음과 같다.

$$x_i^a = \begin{bmatrix} x_1(i) \\ x_2(i) \\ r_1(i) \\ r_2(i) \\ r_3(i) \\ r_4(i) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_i \\ r_i \end{bmatrix} \quad (19)$$

이 모델에서 관측의 수는 4, 상태의 수는 7로 관측가능 (observable) 조건을 충족시킬 수 없기 때문에 출력으로부터 상태변수를 평가할 수 없다. 이 모델에서 고정노드의 수를 증가하더라도 상태의 수가 증가하게 되어 해결 방안이 될 수 없다. 이를 극복하기 위하여 각 고정노드와 이동노드간의 주파수편이를 고려한 상태변수를 동일하게 묶으로써 상태변수의 수를 줄일 수 있다.

$$r(i) = r_1(i) = r_2(i) = r_3(i) = r_4(i) \quad (20)$$

$$x_i^a = \begin{bmatrix} x_1(i) \\ x_2(i) \\ r(i) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_i \\ r_i \end{bmatrix} \quad (21)$$

### 3. 제안 알고리즘

각 고정노드와 이동노드 간의 주파수 편이는 이동노드가 공통적으로 사용되고 있으나 고정노드는 모두 다르다. 고정노드의 절대 주파수편이는 서로 다르다. 따라서 고정노드를 포함하여 얻어지는 절대 또는 상대 주파수편이를 위치추정 모델에 포함시킬 수 있다. IEEE 802.15.4에서와 같이 주파수 편이는 계수기의 값 차이로 나타나며, 계수기 값은 TOF에 비례하고 따라서 거리에 비례한다. 따라서 주파수편이 상태변수를 추가한 확장 관측벡터  $y_i^a$ 를 다음과 같이 나타내면, 순간  $i$ 에서  $k$ 번째 고정노드와 이동노드간의 거리  $d_k(i)$ 는 다음과 같이 보상되어  $d_k^a(x_i^a)$ 로 나타낼 수 있다.

$$y_i^a = \begin{bmatrix} y_1^a(i) \\ y_2^a(i) \\ y_3^a(i) \\ y_4^a(i) \end{bmatrix} = h_i(x_i, v_i) = d_i^a(x_i^a) + v_i \quad (22)$$

$$d_k^a(x_i^a) = (1 + r(i) + f_k)d_k(i) \quad (23)$$

여기에서,

$f_k$  : 고정노드  $k$ 의 주파수 편이

주파수편이 상태변수를 추가한 비선형상태방정식은 다음과 같다.

$$x_i^a = \begin{bmatrix} x_1(i) \\ x_2(i) \\ r(i) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_i \\ r_i \end{bmatrix} \quad (24)$$

$$\begin{bmatrix} x_{i+1} \\ r_{i+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_i \\ r_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_i \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} w_i \\ w_i^r \end{bmatrix} \quad (25)$$

위치를 강제로 변경하는 입력은 없다고 가정하면, 비선형 상태방정식은 다음과 같다.

$$x_{i+1}^a = f_i^a(x_i^a, w_i^a) = x_i^a + w_i^a \quad (26)$$

$$y_i^a = h_i^a(x_i^a, v_i) = d_i^a(x_i) + v_i \quad (27)$$

여기에서,

$$w_i^a = \begin{bmatrix} w_i \\ w_i^r \end{bmatrix}$$

주파수편이 상태변수를 추가한 관측벡터방정식의 자코비안행렬과 프로세서벡터방정식의 자코비안행렬은 각각 다음과 같다.

$$F_i^a = \left. \frac{\partial f_i^a(x_i^a, w_i^a)}{\partial x_i^a} \right|_{x_i^a = \hat{x}_{i|i-1}^a} \quad (28)$$

$$H_i^a = \left. \frac{\partial h_i^a(x_i^a, v_i^a)}{\partial x_i^a} \right|_{x_i^a = \hat{x}_{i|i-1}^a} \quad (29)$$

여기에서,

$$\hat{x}_{i|i-1}^a = \begin{bmatrix} \hat{x}_1^a(i|i-1) \\ \hat{x}_2^a(i|i-1) \\ \hat{r}^a(i|i-1) \end{bmatrix}$$

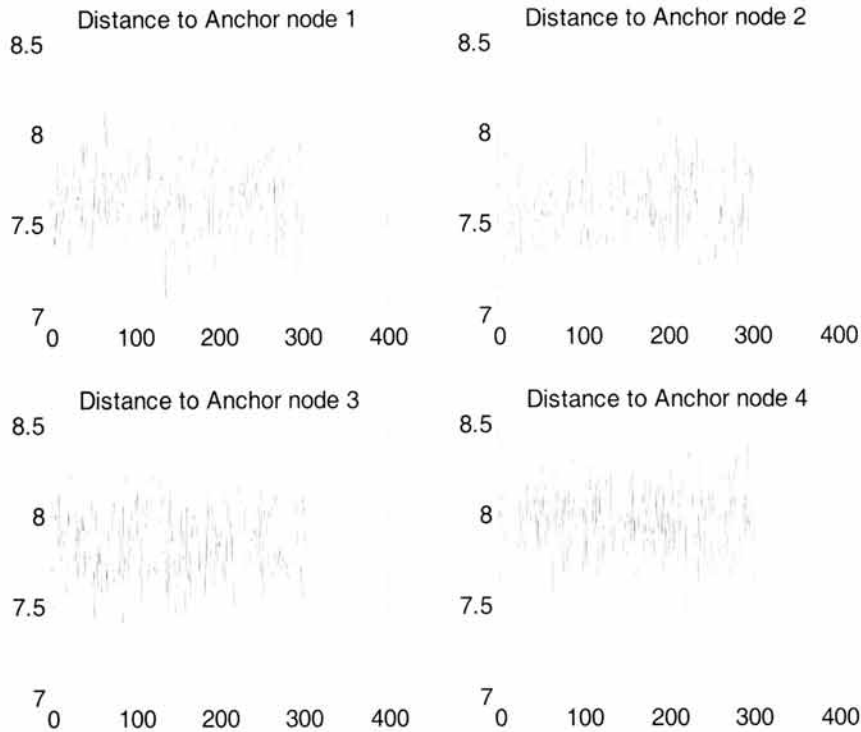


그림 1. 각 고정노드와 이동노드 간의 실제 측정거리(m)  
 Fig. 1. Measured distances between a mobile node and each anchor node(m)

#### 4. 실험 및 분석

##### 4.1 실험 방법

CSS 기반의 노드를 사용하여 (10m x 10m) 2차원 환경에서 이동노드의 위치를 추정하는 실험을 수행하였다. 센서노드는 고정노드 4개, 이동노드 1개, 이동노드와 고정노드를 제어하고 결과값을 컴퓨터에 저장하기 위한 노드 등 6개를 사용하였다. 각 지지대 위에 센서노드를 고정하고, 알려진 4개의 위치에 고정노드를 설치하였다. 이동노드는 실험의 편의상 하나만 사용하였으며, 특정 위치에 둔 상태에서 TWR을 다수 반복하여 각 고정노드와 이동노드의 거리를 추정한 데이터를 취득하였다. 이동노드의 위치는 (0m, 0m), (2.5m, 2.5m), (2.5m, -2.5m), (-2.5m, 2.5m) 그리고 (-2.5m, -2.5m) 등 5개의 위치를 선정하여 실험하였다. 각 고정노드와 이동노드 간의 거리는 별도의 파일로 저장하였으며, 이를 Matlab 프로그램에서 입력 데이터로 읽어서 기존 알고리즘과 제안된 알고리즘을 확장 Kalman 필터에 적용하여 수행하고 성능을 비교하였다. Fig. 1은 이동노드의 위치가 (0m, 0m)인 상태에서의 각 고정노드와 이동노드 간에 300여 회 측정된 거리이다. CSS 소자의 센서노드에서는 거리측정 값이 큰 범위에서 진동하는데 이는 UWB 기술에 비하여 거리측정 오차가 크다는 것을 해석할 수 있다. 고정노드와 이동노드간의 거리측정 명령이 수행되지 못한 경우, 측정오류를 나타내는 응답으로 거리 값이 -1m로 나타난다.

##### 4.2 실험 결과 및 분석

CSS 소자를 사용한 무선노드의 위치추정은 매우 부정확하기 때문에 이동노드의 위치에 따른 측정 거리를 사용하여 고정노드의 주파수 편이 평균값을 미리 계산하여 사용하였다. CSS 노드를 제어하는 거리추정 함수는 측정된 거리를 반환하기 때문에 규격에서 기술한 Timestamp 값을 사용하기 어렵다. 따라서 측정된 거리값과 이동노드와 고정노드의 위치를 알고 있는 상황에서 실제 거리를 알고 있기 때문에 이들 간의 비율로부터 주파수 편이를 계산할 수 있다.

본 논문에서 나타낸 결과는 이동노드의 위치에 따라 x축 오차, y축 오차, 위치오차 등으로 결과를 도출하였다. 사용한 알고리즘은 확장 Kalman 필터, 공통 변수를 사용한 확장 Kalman 필터, 주파수편이를 적용한 확장 Kalman 필터 등이다. Fig. 2는 (0m, 0m)인 상태에서 추정된 이동노드의 x축 오차, y축 오차, 위치오차, 그리고 이동노드와 고정노드간의 주파수 편이를 반영하는 공통변수의 변화를 나타낸 것이다. (0m, 0m)의 위치는 이동노드에서 4개 고정노드 간의 거리가 동일한 특별한 형태이다. 그림에서와 같이 (a), (b), (c)에서 Kalman 필터 수행에 따른 추정 수행이 반복될수록 각각의 오차가 수렴하는 형태이며, 성능은 녹색의 실제위치(True Position)를 기준으로 빨간색의 제안된 방식(Freq Offset EKF)과 파란색의 기존의 공통바이어스 방식(Common Biased EKF)과 검정색의 일반EKF방식(normal EKF)을 비교하였다. 본 논문에서 제안된 알고리즘이 가장 우수하며, 그 다음으로 기존 연구인 기존의 공

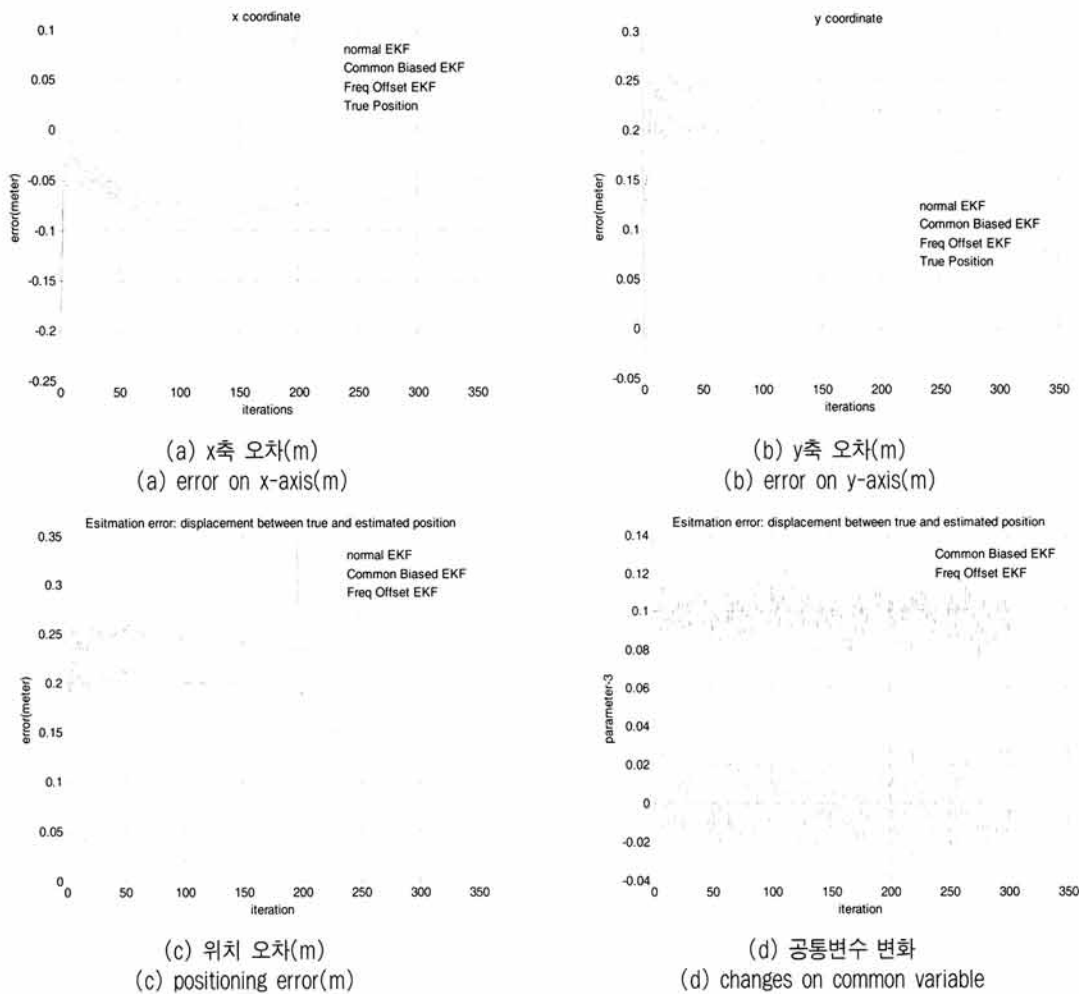


그림 2. 위치 (0m, 0m)에서의 오차 및 공통변수 변화  
Fig. 2. Errors and changes at true position(0m, 0m)

통바이어스방식과 별도의 보상이 없는 일반EKF방식 순으로 좋은 특성을 나타내었다. 제안된 알고리즘은 기존의 최고 성능을 보여준 공통바이어스방식보다 x축으로 6cm 정도, y축으로 18cm 정도, 따라서 위치는 18cm 정도로 개선되었음을 확인할 수 있다. 일반EKF방식은 기존의 공통바이어스방식과 5cm 정도의 차이를 나타내었다. 특히, 제안된 방식은 횟수가 많아질수록 거의 이동노드에 수렴한다는 것을 확인할 수 있다. 공통변수변화는 제안된 방식이 노드별 주파수편이를 보상함으로써 거의 0 값에서 상하로 약간씩 변화하는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 3은 (2.5m, 2.5m)인 상태에서 추정된 이동노드의 x축 오차, y축 오차, 위치 오차, 그리고 이동노드와 고정노드 간의 주파수 편이를 반영하는 공통변수의 변화를 나타낸 것이다. (2.5m, 2.5m)의 위치는 이동노드에서 4개 고정노드 가운데 2개의 노드와는 거리가 가깝고, 나머지 2개의 노드와는 먼 경우이다. Fig. 2와 동일하게 특성을 분석하였으며, 그 결과도 거의 유사하다. 그림에서와 같이 제안된 알고리즘은 기존의 최고 성능을 보여준 공통바이어스방식보다 x축으로 거의 동일하고, y축으로 10cm 정도, 따라서 위치는

10cm 정도로 개선되었음을 확인할 수 있다. 일반EKF방식은 실제위치와는 x축으로 거의 38cm, y축으로 53cm 정도, 따라서 위치는 65cm 정도 오차를 나타내었다.

Table 1은 이동노드의 각 위치에서 각 고정노드별 주파수편이를 나타낸 것이다. 실제거리는 고정노드와 이동노드의 좌표를 2차원으로 계산한 거리이고, 측정거리는 3차원 실험 공간에서 측정한 거리의 평균값을 사용하였다. 동일한 이동노드가 고정노드와 이동노드 쌍에 동일하게 개입되므로 이동노드의 주파수 편이는 없는 것으로 가정하고, 계산된 주파수 편이는 고정노드의 주파수편이로 배정하였다. 표에서와 같이 측정거리는 당연히 실제거리보다 항상 크게 나타나며, 주파수편이는 양의 값으로 계산된다. 원래의 주파수 편이는 고정노드 별로 동일한 값이 되어야 하며, 본 논문에서 도입한 주파수 편이는 거리로부터 구하였기 때문에 거리에 비례하는 값이 나타날 것으로 예상하였다. 그러나 주파수 편이 값이 거리에 비례하는 특성을 찾기 어려웠다. 실험 결과로 미루어 CSS 기술을 적용한 노드를 사용하더라도 해당 위치별로 주파수편이를 적용할 수 있으면, 이동노드의 위치를 정확하게 추정할 수 있는 가능성이 있다는 것이다.

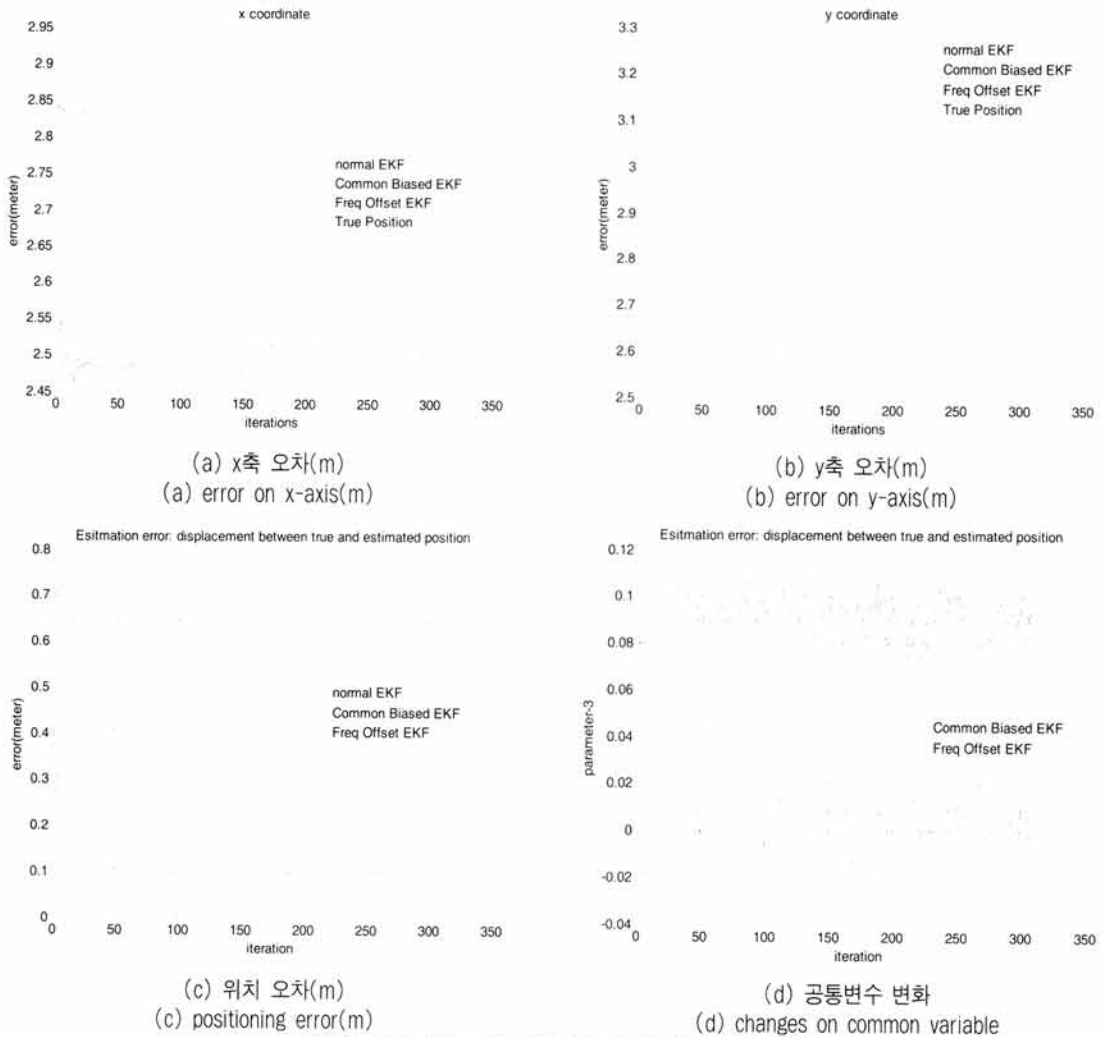


그림 3. 위치 (2.5m, 2.5m)에서의 오차 및 공통변수 변화  
Fig. 3. Errors and changes at true position(2.5m, 2.5m)

표 1. 각 고정노드별 주파수편이(거리단위 : m)  
Table 1. Frequency offsets of anchor nodes(unit : m)

위치	파라메타	노드1	노드2	노드3	노드4
x=0 y=0	실제거리	7.07	7.07	7.07	7.07
	측정거리	7.65	7.60	7.85	7.97
	주파수편이	0.0819	0.0748	0.1102	0.1271
x=2.5 y=2.5	실제거리	3.54	7.91	10.61	7.91
	측정거리	3.85	8.45	11.85	8.58
	주파수편이	0.0889	0.0688	0.1172	0.0853
x=-2.5 y=2.5	실제거리	7.91	3.54	7.91	10.61
	측정거리	8.43	3.76	8.47	11.59
	주파수편이	0.0663	0.0635	0.0714	0.0927
x=-2.5 y=-2.5	실제거리	10.61	7.91	3.54	7.91
	측정거리	11.60	8.47	3.95	8.65
	주파수편이	0.0937	0.0714	0.1172	0.0941
x=2.5 y=-2.5	실제거리	7.91	10.61	7.91	3.54
	측정거리	8.65	11.29	8.74	3.97
	주파수편이	0.0941	0.0644	0.1055	0.1229

### 5. 결론

본 논문은 CSS 기술을 적용한 노드를 사용하여 이동노드의 위치를 추정하는 시스템의 성능을 개선하기 위하여 확장 Kalman 필터에 주파수편이를 적용하는 방식에 대하여 연구하였다. 고정노드와 이동노드 쌍에서 발생하는 주파수편이를 Kalman 필터에 적용하기 위하여 Controllable 및 Observable이 보장되어야 하기 때문에 주파수 편이를 공통 변수와 각 노드 쌍의 특성을 반영하는 개별상수를 적용하는 모델을 제시하였다. 제안된 알고리즘을 사용함으로써 CSS 노드를 사용하고도 10cm 이내의 매우 개선된 위치 추정이 가능하다는 것을 보였다.

주파수편이에서 노드쌍의 개별상수를 도출하기 위하여 비록 이동노드의 실제 위치 값을 적용하여 절대주파수편이에 해당하는 값을 도출하여 사용하였다. 이후 연구는 절대주파수편이와 상대주파수편이의 차이를 조사 분석하고, 이를 바탕으로 고정노드 간의 실제거리와 측정거리 값을 적용하는

연구가 필요하다. 또한 본 논문에서는 2차원으로만 분석하였으나 보다 성능을 개선하기 위해서는 3차원 분석이 이루어져야 할 것이다. 또한 본 논문에서는 4개의 고정노드를 사용하였으나, Kalman 필터의 변수를 확장하고, 성능을 개선하기 위해서는 보다 많은 수의 고정노드를 활용하는 것이 필요할 것이다.

제안된 방식은 CSS 노드를 사용하는 프로그램에서 제공하는 거리 값을 받아서 시작하였으므로 TWR 또는 SDS-TWR 기반 알고리즘이며 또한 TOA 기반 알고리즘이다. 노드로부터 Timestamp 정보를 받고, 단방향 거리 추정이 가능하도록 프로그램을 보완하면 제안된 방식을 TDOA에도 적용할 수 있을 것이다.

### 참 고 문 헌

[1] IEEE802.15.4a/D7, "Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer(PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs): Amendment to add alternate PHY," Jan., 2007.  
 [2] WiMedia Alliance, "Distributed Medium Access Control (MAC) for Wireless Network," Draft 1.2, March, 2008.  
 [3] IEEE802.11v, "Amendment 8 : IEEE 802 Wireless Network Management," Feb., 2011.  
 [4] Zafer Sahinoglu and Sinan Gezici, "Ranging in the IEEE 802.15.4a Standard," IEEE Wireless and Microwave Technology Conference (WAMICON), Dec., 2006.  
 [5] Yoon-Seok Nam and Ik-Hyeon Jang, "Ranging Enhancement using Frequency Offset Compensation in High Rate UWB," Journal on KIPS, Vol.16-C, No.2, pp.229-236, April, 2009.

[6] Yoon-Seok Nam, Bub-Joo Kang, Jae-Doo Huh, and Kwang-Roh Park, "Wirelessly Synchronized One-Way Ranging Algorithm with Active Mobile Modes," ETRI Journal, Vol.31, No.4, pp.466-468, Aug., 2009.  
 [7] 김학용, 김성덕, 서동길, 지정강, 장현태, "근거리 위치추적 기술 동향," 주간기술동향, 통권1322호, 1-12쪽, 2007년 11월.  
 [8] J.-E. Kim, J. Kang, D. Kim, Y. Ko, and J. Kim, "IEEE 802.15.4a CSS-based localization system for wireless sensor networks," in Proc. Int. Conf. MASS, pp.1-3, Oct., 2007.  
 [9] Hyeonwoo Cho and Sang Woo Kim, "Mobile Robot Localization Using Biased Chirp-Spread-Spectrum Ranging", IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol.57, No.8, pp.2826-2835, August, 2010.  
 [10] Bahl, P. and Padmanabhan, V. "RADAR: An In-Building RF-Based User Location and Tracking System", IEEE Infocom 2000, Vol.2, pp.775-784, Aug., 2000.



남 윤 석

e-mail : ysnam@dongguk.ac.kr

1984년 경북대학교 전자공학과(공학사)

1987년 경북대학교 전자공학과(공학석사)

1995년 경북대학교 전자공학과(공학박사)

1987년~2000년 한국전자통신연구원

책임연구원

2000년~현 재 동국대학교 정보통신공학과 교수

관심분야: 통신시스템, 통신프로토콜, 트래픽 제어, 성능평가, 위치추정, WPAN, WBAN 등