

---

# 실내 NLOS 환경에서 정밀도 향상을 위한 IEEE 802.15.4a 기반의 위치추정 알고리즘

차재영\* · 공영배\*\* · 최증원\*\*\* · 고종환\*\*\* · 권영구\*\*\*\*

## IEEE 802.15.4a based Localization Algorithm for Location Accuracy Enhancement in the NLOS Environment

Jae-Young Cha\* · Young-Bae Kong\*\* · Jeung-Won Choi\*\*\* · Jong-Hwan Ko\*\*\* · Young-Goo Kwon\*\*\*\*

---

이 논문은 국방과학연구소 선행핵심기술과제의 시제(UG110176ED) 내 외주용역비 지원을 받아 수행된 것임.

---

### 요 약

IEEE 802.15.4a 표준은 정확한 위치추정 서비스를 지원하기 위하여 time-of-arrival (TOA) 기반의 거리측정 기술을 제공한다. 특히, non-line-of-sight (NLOS) 상황은 TOA 기반의 위치인식에서 중요한 문제이고, IEEE 802.15.4a 네트워크의 성능에 심각한 영향을 끼칠 수 있다. 본 논문에서는 에너지 효율적인 낮은 복잡도의 위치추정 알고리즘을 제안한다. 제안한 알고리즘은 TOA 거리측정을 위해 순차적인 acknowledgment (ACK) 패킷을 이용하고 위치추정지역을 제한할 수 있는 작은 사각 영역을 설정함으로써 위치를 추정한다. 패킷 교환으로 인한 메시지 오버헤드는 순차적 ACK 패킷을 이용하여 감소될 수 있다. 사각 영역 설정을 통하여 NLOS 환경에 있는 거리측정 값을 제거하고, 위치 추정의 영역을 제한함으로써 추정하는 연산 시간과 에너지를 줄일 수 있다. 시뮬레이션을 통해 에너지 소모와 추정 위치의 정확도 측면에서 제안한 알고리즘이 기존의 알고리즘 보다 좋은 성능을 보이는 것을 확인하였다.

### ABSTRACT

IEEE 802.15.4a standard can provide a variety of location-based services for ZigBee or wireless network applications by adapting the time-of-arrival (TOA) ranging technique. The non-line-of-sight (NLOS) condition is the critical problem in the IEEE 802.15.4a networks, and it can significantly degrade the performance of the TOA-based localization. To enhance the location accuracy due to the NLOS problem, this paper proposes an energy-efficient low complexity localization algorithm. The proposed approach performs the ranging with the multicast method, which can reduce the message overhead due to packet exchanges. By limiting the search region for the location of the node, the proposed approach can enhance the location accuracy. Experimental results show that the proposed algorithm outperforms previous algorithms in terms of the energy consumption and the localization accuracy.

### 키워드

IEEE 802.15.4a, NLOS 환경, 위치추정, TOA 거리측정

### Key word

IEEE 802.15.4a, NLOS environment, localization, TOA ranging

---

\* 정회원 : 건국대학교 (chaj00@konkuk.ac.kr)  
\*\* 정회원 : 한국원자력연구소  
\*\*\* 정회원 : 국방과학연구소  
\*\*\*\* 정회원 : 건국대학교 (교신저자)

접수일자 : 2012. 03. 14  
심사완료일자 : 2012. 05. 05

**Open Access** <http://dx.doi.org/10.6109/jkiice.2012.16.8.1789>

© This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

## I. 서 론

통신기술의 발달로 위치정보를 이용한 응용서비스에 관심이 높아지고, 위치기반 기술 및 시스템에 관한 많은 연구가 진행되고 있다[1,2,3,4]. 위치기반 서비스를 위해, 정확한 위치정보를 얻기 위한 위치 추정 기술은 매우 중요한 역할을 한다. 예를 들면, 박물관 또는 공항 안내, 환자 모니터링, 화물 추적 등의 다양한 위치 기반 서비스들에서 위치 추정 기술은 핵심적인 역할을 하고 있다. 앞으로도 다양한 위치 기반의 서비스는 계속해서 나타나며 위치 추정 기술의 중요성은 계속해서 증가할 것으로 예상된다.

하지만 위치 추정 기술의 중요성에도 불구하고 기존의 위치 측위 기술은 만족할 만한 수준의 정확도를 달성하지 못하고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 IEEE 협회에서는 최근에 정확한 거리측정 및 위치추정을 위한 IEEE 802.15.4a 표준을 제정하였다[5]. IEEE 802.15.4a 표준은 ultra wide band (UWB)와 chirp spread spectrum (CSS) 두 개의 추가적인 물리계층을 정의하였다. IEEE 802.15.4a 표준은 보다 정확한 거리 측정을 위해 송신노드에서 보낸 전파신호가 수신노드에 도착하는 시간으로 거리를 측정하는 time-of-arrival (TOA) 기반의 two-way ranging (TWR) 기술을 정의 하였지만, 위치 추정을 위한 알고리즘은 별도로 정의하지 않았다. 따라서 IEEE 802.15.4a 기반의 네트워크는 TWR-TOA를 기반으로 하는 다양한 위치 추정 알고리즘을 적용할 수 있다.

위치 추정 기술은 Additive White Gaussian Noise (AWGN)으로 인한 거리 측정 오차가 위치 정확도에 영향을 미치기 때문에 AWGN의 영향을 고려하여야한다. 실제로, 일부 위치추정 알고리즘은 AWGN의 영향을 제거하기위하여 maximum likelihood estimation (MLE)를 이용한다[2]. MLE 기반의 위치추정알고리즘은 AWGN에 강하며 만족할 만한 위치 정확도를 달성할 수 있다. 하지만, MLE 기반의 위치 추정 알고리즘은 위치추정 노드들 사이에 장애물 등에 의한 비가시성환경(non-line-of-sight, NLOS) 영향에 매우 민감하며, 이러한 NLOS의 영향은 AWGN의 영향보다 더 큰 위치 인식 오차를 발생시킨다[9, 10].

[7, 8, 9]의 알고리즘들은 NLOS 영향을 줄이기 위하여 가시성환경(line-of-sight, LOS) 상황의 거리측정 값만을

이용하거나 LOS 상황의 거리측정 값에 가중치를 두어 위치를 추정한다. [10]에서, 위치를 모르는 블라인드(blind) 노드는 NLOS 상황에서의 거리측정값을 가지고 영역을 제한하고 영역 내에서 선형 프로그래밍을 이용하여 위치를 추정한다. 이러한 NLOS를 고려한 위치 추정 알고리즘은 다음과 같은 문제점을 갖는다. 첫 번째로, NLOS 신호는 AWGN의 분산보다 더 큰 지연확산(delay spread)을 가지기 때문에, 이러한 NLOS 영향을 보상해주는 알고리즘들은 NLOS 신호와 LOS 신호를 구별할 수 있다고 가정한다.

하지만, 실제 환경에서 이러한 NLOS/LOS 신호를 구별하는 것은 매우 어려우며 이를 위해서는 추가적인 신호 데이터 및 연산이 필요하다. 두 번째로, IEEE 802.15.4a 기반의 무선 노드는 적은 용량의 배터리 및 메모리, 저전력 마이크로프로세서를 포함한다. 따라서 위치추정 알고리즘의 계산 복잡도와 에너지 소모를 최소화하는 것은 매우 중요한 문제이다. 하지만 MLE 기반의 위치 인식 알고리즘은 지수함수가 포함된 확률 밀도 함수(probability density function, PDF)를 계산해야 하기 때문에 노드의 위치를 찾기 위해 복잡한 연산을 필요로 한다. 뿐만 아니라, 노드 간 거리 측정을 위하여 블라인드 노드는 이미 위치를 알고 있는 앵커(anchor) 노드와 많은 패킷을 교환해야 하기 때문에 추가적인 통신 오버헤드를 발생시킬 수 있다.

이러한 문제점을 해결하기 위하여 본 논문에서는 IEEE 802.15.4a 네트워크 기반의 에너지 효율적인 위치 추정 알고리즘을 제안한다. 제안된 알고리즘은 다수의 앵커 노드가 순차적으로 ACK 패킷을 보내도록 우선순위가 정보가 담긴 멀티캐스트 패킷을 전송함으로써, 거리 측정으로 인한 메시지 오버헤드를 줄일 수 있다. 또한, 블라인드 노드는 측정된 거리를 이용하여 자신의 위치주변에 사각 영역 (Bounding Box)을 설정하고, NLOS 에러를 가진 거리측정값은 위치 추정에서 제외시킨다.

따라서 NLOS 에러로 인한 위치 측정 오차는 효과적으로 감소되고 블라인드 노드의 위치 정확도는 향상된다. 시뮬레이션 결과는 에너지 소모 및 위치의 정확도 측정에서 제안한 알고리즘이 기존의 알고리즘에 비해 향상된 성능을 보여준다.

## II. 관련연구

### 2.1. 기본 위치 추정 방식

IEEE 802.15.4a 네트워크 기반의 위치 추정 방식은 다음과 같다. 먼저, 네트워크의 노드들은 위치를 알고 있는 앵커 노드와 위치를 모르는 블라인드 노드로 구성된다. 블라인드 노드의 위치를 추정하기 위해서는 위치 좌표가 2차원인 경우에 적어도 3개 이상의 앵커 노드가 필요하다. 블라인드 노드는 앵커 노드의 위치 및 앵커 노드들과의 측정된 거리를 이용하여 자신의 위치를 추정한다.

$X_i = [x_i \ y_i]^T$  과  $\hat{X} = [\hat{x} \ \hat{y}]^T$  를 각각  $i$  번째 앵커 노드의 위치와 추정된 블라인드 노드의 위치라고 정의하자. IEEE 802.15.4a 네트워크에서 블라인드 노드와  $i$  번째 앵커 노드와의 거리를 측정하기 위해서는 two-way-ranging (TWR) 방식이 이용된다.

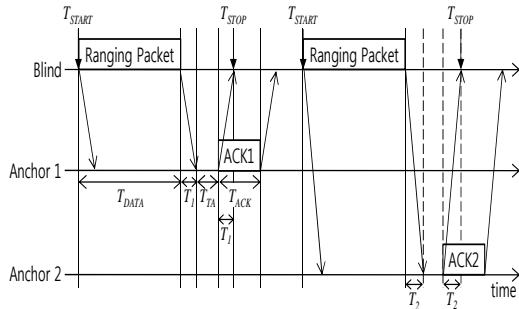


그림 1. TWR 거리측정 방식  
Fig. 1 TWR algorithm

그림 1 에서처럼 TWR은 두 개의 노드는 TOA 값을 측정하기 위해 거리측정 패킷과 ACK 패킷을 주고받는다. 만약 한 앵커노드가 거리측정 패킷을  $T_{START}$  시간에 송신하고 ACK 패킷을  $T_{STOP}$  시간에 수신하였다면, TOA 측정값은 다음과 같다.

$$T_i = (T_{STOP} - T_{START} - T_{DATA} - T_{TA}) / 2 \quad (1)$$

$T_{TA}$  는 수신 모드와 송신모드의 전환 시간을 나타낸다. IEEE 802.15.4a 표준에서 short inter-frame space (SIFS) 로 정의 되어 있다.  $T_{DATA}$  는 거리측정 패킷을 전송하는데 소요된 시간을 나타낸다.

블라인드 노드와  $i$  번째 앵커 노드와의 측정 거리는 다음과 같은 모델로 표현될 수 있다[6].

$$\hat{d}_i = d_i + n_i + b_i = c \cdot T_i, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (2)$$

$d_i$  와  $T_i$  는 각각 블라인드 노드와  $i$  번째 앵커 노드 사이의 실제 거리와 TOA 측정 시간을 나타낸다.  $c$  는 빛의 속도를 나타낸다.  $n_i \sim N(0, \sigma_i^2)$  는 분산  $\sigma_i^2$  를 가지는 AWGN을 나타내고,  $b_i \sim U(0, b_{max})$  는 NLOS 상황에 의한 바이어스 에러를 나타낸다.

### 2.2. Maximum likelihood Estimation(MLE)와 Least Squares Estimation(LSE)

Maximum likelihood estimation (MLE)는 블라인드 노드의 위치를 찾기 위하여 확률 밀도 함수(PDF)를 이용한다. 먼저, MLE 방식은 네트워크 영역을 같은 크기의 작은 사각의 셀로 분할한다.  $K$  를 셀의 중심 좌표라 하고  $\|K - X_i\|$  는 두 지점  $K$  와  $X_i$  사이의 실제 거리를 나타낸다. 만약 NLOS 바이어스 에러가 없다면,  $K$  가 주어 진 상태에서  $\hat{d}$  의 결합 조건부 확률 밀도 함수는 다음과 같다[7].

$$P(\hat{d}|K) = \prod_{i=1}^N \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_i^2}} \exp \left\{ -\frac{(\hat{d}_i - \|K - X_i\|)^2}{2\sigma_i^2} \right\} \quad (3)$$

$\hat{d}_i = [\hat{d}_1 \ \hat{d}_2 \ \dots \ \hat{d}_N]^T$  는  $i$  번째 앵커 노드와 블라인드 노드사이의 측정된 거리 벡터를 나타낸다.

MLE 방식은 최대  $P(\hat{d}|K)$  값을 가지는 셀의 중심위치를 블라인드 노드의 위치로 추정하며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\hat{X} = \arg \max_{K \in \Omega} P(\hat{d}|K) \quad (4)$$

$\Omega$ 는 셀들의 중심 좌표의 집합을 나타낸다.

그림 2는 MLE 방식의 위치 추정 예제를 나타낸다. 그림 2에서 보는 것처럼, MLE 방식에서 분할된 각각의 셀에서 확률밀도함수  $P(\hat{d}|K)$ 를 계산하고, 가장 큰  $P(\hat{d}|K)$ 를 가지는 셀의 중심좌표를 블라인드 노드의 추정위치로 결정한다.

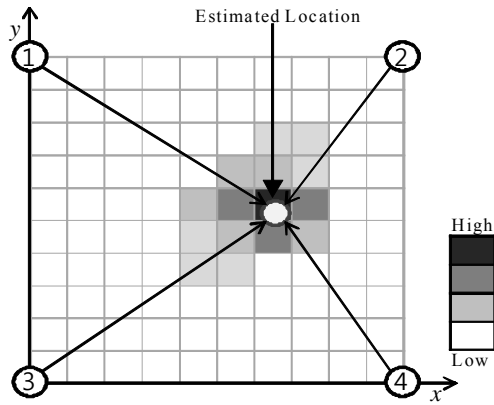


그림 2. MLE 예제  
Fig. 2 MLE example

Least square estimation(LSE)는 실제 데이터  $x[n]$ 과 측정된 데이터  $s[n]$ 의 오차의 제곱 값의 함수  $J_N$ 의 최소값을 이용하여 위치를 추정하는 방식이다. LSE 방식에서 측정된 데이터  $s[n]$ 은 측정 부정확성에 의해 실제 데이터  $x[n]$ 와 차이를 보이며 두 데이터의 오차를 나타내는 함수  $J_N$ 은 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$J_N = \sum_{n=1}^N (x[n] - s[n])^2 \quad (5)$$

LSE 방식을 이용하는 위치추정에서 MLE와 마찬가지로 전체 네트워크 영역을 같은 크기의 작은 셀로 분할한다.

$K$ 를 분할된 LSE 셀의 중심 좌표라 한다. LSE 셀의 중심과  $i$  번째 앵커 노드 사이의 실제 거리 실제 거리  $\|K - X_i\|$ 가 실제 데이터  $x[n]$ 이고, 블라인드 노드와  $i$  번째 앵커 노드 사이 측정된 거리  $\hat{d}_i$ 가 측정 데이터  $s[n]$ 을 나타낸다. LSE 방식은 각각의 사각영역에서 실제 거리  $\|K - X_i\|$ 와 측정된 거리  $\hat{d}_i$  오차를 계산한다. 오차의 제곱의 합이 최소가 되는 사각영역의 중심 좌표가 추정된 위치이다. 위치추정을 위한 함수  $J_N$ 과 추정된 위치  $\hat{X}$ 의 다음과 같이 표현된다.

$$J_N = \sum_{i=1}^N (\|K - X_i\| - \hat{d}_i)^2 \quad (6)$$

$$\hat{X} = \arg \min_{X \in \theta} J_N \quad (7)$$

$\theta$ 는 각 셀의 중심 좌표의 집합을 나타낸다.

### III. 제안한 알고리즘

본 논문에서는 IEEE 802.15.4a 네트워크에서 멀티캐스트를 이용한 에너지 효율적인 위치 인식 알고리즘을 제안한다. 제안된 알고리즘에서 블라인드 노드는 ACK 응답 우선순위 정보가 담긴 멀티캐스트 패킷을 전송한다. 수신된 우선 순위 정보에 따라 각 앵커노드는 순차적으로 ACK 패킷을 블라인드 노드에게 전송한다.

다음으로 NLOS 에러에 의한 오차와 연산의 오버헤드를 줄이기 위하여 블라인드 노드는 자신의 위치 주변에 사각영역 (Bounding Box)를 설정한다. 만약 블라인드 노드와 앵커 노드 사이에 장애물이 있는 NLOS 상황에서 측정된 거리는 블라인드 노드 추정위치를 매우 부정확하게 한다. 이를 해결하기 위하여 제안된 알고리즘은 NLOS 상황에 있는 앵커노드의 측정거리를 제외하고 나머지 측정거리만을 가지고 LSE 방식을 이용하여 위치를 추정한다.

### 3.1. 멀티캐스트 방식을 이용한 TOA 거리측정

그림 1에서 나타난 것처럼 기존의 TWR의 거리 측정 방식에서 블라인드 노드는 앵커노드와 거리측정 패킷과 ACK 패킷을 각각 하나씩 교환함으로써 TOA 값을 측정한다.

따라서 TWR의 방식에서 블라인드 노드는 N개의 앵커노드로부터 TOA 값을 측정하기 위하여 N번 거리측정 패킷을 교환해야 하며 이는 메시지 오버헤드를 발생시킬 수 있다. 그림 3은 IEEE 802.15.4a에서 멀티캐스트 방식을 이용하여 순차적 ACK 패킷을 전송하는 TOA 방식을 나타낸다. 제안된 거리 측정 방식에서 블라인드 노드는 ACK 패킷을 보내는 순서 정보가 포함된 멀티캐스트 패킷을 전송함으로써 한 번에 다수의 앵커 노드에 대한 거리를 측정한다. 이를 통하여 제안된 방식은 거리측정 패킷의 오버헤드를 줄일 수 있다.

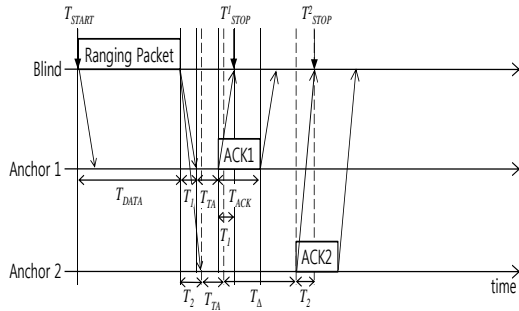


그림 3. 멀티캐스트를 이용한 TOA 거리측정 방식  
Fig. 3 TOA ranging using Multicast packet

먼저, 앵커 노드는 주기적으로 자신의 위치정보와 노드 주소 정보를 포함한 비콘메시지를 브로드캐스트한다. 비콘 메시지를 수신한 블라인드 노드는 앵커노드 테이블에 저장되어있는 앵커 노드의 정보를 업데이트 한다. 각 앵커 노드가 ACK 패킷을 순차적으로 보내도록 하기 위하여, 블라인드 노드는 ACK 패킷 순위 정보를 거리측정 패킷의 목적지 노드 주소 필드에 앵커 노드의 주소와 함께 기입한다.

거리측정 패킷을 수신한 각각의 앵커노드는 ACK 패킷을 보내기 전 대기시간을 계산한다. 만약 한 앵커 노드가 수신한 거리측정 패킷의 목적지 노드 주소 필

드에서 자신의 주소가  $i$  번째 위치한다면, 앵커노드는  $T_{TA} + (i-1) \times T_{\Delta}$  시간만큼 대기한 후 ACK 패킷을 전송한다.  $T_{\Delta}$  는 ACK 패킷 전송을 하는 앵커노드의 기본 대기시간이다.

$$T_{\Delta} = T_{ACK} + d_{MAX} / c \quad (8)$$

$T_{ACK} = l_{ACK} / \mu$  는 ACK 패킷의 전송 시간 간격이다.  $l_{ACK}$  과  $\mu$  는 ACK 패킷의 길이와 전송속도를 나타낸다.  $d_{MAX}$  는 최대 전송 거리를 나타낸다. 만약 블라인드 노드가 거리측정 패킷을  $T_{START}$  시간에 전송하고  $i$  번째 앵커노드로부터 ACK 패킷을  $T_{STOP}^i$  시간에 수신했다면, 블라인드 노드와  $i$  번째 앵커노드 사이의 거리는 다음과 같다.

$$\hat{d}_i = c \cdot \frac{(T_{STOP}^i - T_{START} - T_{DATA} - T_{TA} - (i-1) \cdot T_{\Delta})}{2} \quad (9)$$

### 3.2. 위치 추정 범위 제한 및 NLOS 감지

제안한 알고리즘은 NLOS에 의한 오차와 연산의 오버헤드를 줄이기 위하여 위치 추정 범위를 네트워크 전체에서 작은 사각영역으로 제한한다. 블라인드 노드와 앵커 노드 사이의 거리를 측정 후, 사각 영역은 다음과 같이 설정된다.

$$Region = \begin{bmatrix} \max_{i \in N} (x_i - \hat{d}_i) & \max_{i \in N} (y_i - \hat{d}_i) \\ \min_{i \in N} (x_i + \hat{d}_i) & \min_{i \in N} (y_i + \hat{d}_i) \end{bmatrix} \quad (10)$$

$x_i$  와  $y_i$  는  $i$  번째 앵커노드의  $x$  와  $y$  좌표를 나타낸다. 그림 4-(a)에서 보듯이, 식 (10)을 통하여 각 앵커노드를 중심으로 하여 블라인드 노드까지 거리를 각 앵커노드의 좌표에 더하거나 빼서 만든 네 변의 길이로 하는 정사각형을 그려 중첩되는 사각영역을 설정 할 수 있다.

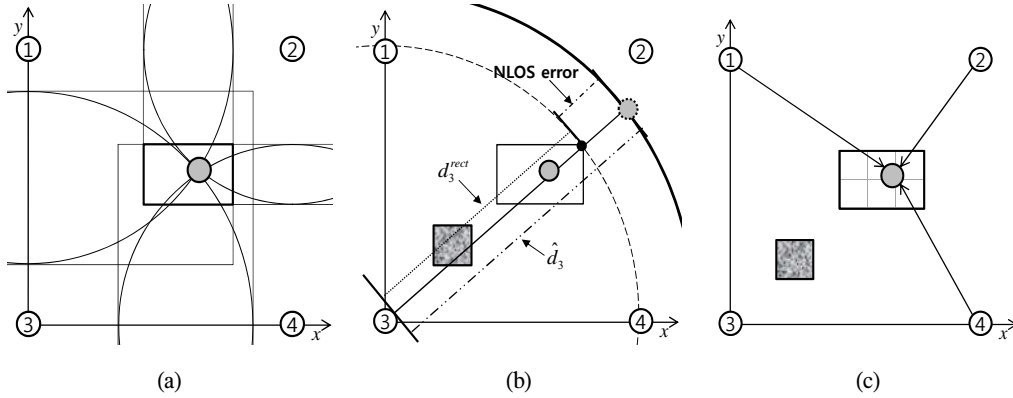


그림 4. 제안한 알고리즘 예제  
 (a) 사각영역 설정 (b) NLOS 감지 (c) NLOS 제거후 LSE 위치추정  
 Fig. 4 The proposed localization algorithm example  
 (a) Bounded rectangular region (b) NLOS detection (c) LSE without NLOS

블라인드 노드가 장애물 등에 의해 NLOS 상황에서 거리측정을 하면, 앵커노드와 블라인드 노드사이의 측정된 거리는 실제 거리보다 더 큰 오차를 가진다. 제안한 알고리즘에서 위치 추정하는 범위를 제한하기 위해 설정한 사각영역을 이용하여 NLOS에 의한 위치 추정 오차를 최소화 한다.

$\hat{d}_i^{rect}$  를  $i$  번째 앵커노드와 사각영역의 4개의 꼭지점까지 거리 중 가장 먼 거리 값이라 하자. 제안된 방식에서는 먼저  $\hat{d}_i^{rect}$  을  $\hat{d}_i$  를 비교한다. 블라인드 노드의 위치는 설정한 사각영역 안에 위치해야 때문에, 만약  $\hat{d}_i$  값이  $\hat{d}_i^{rect}$  보다 크다면  $i$  번째 앵커노드는 NLOS 상황으로 간주한다. 이를 바탕으로 블라인드 노드는 NLOS 측정값을 제거하고  $\hat{d}_i$  이  $\hat{d}_i^{rect}$  보다 작은 값들만으로 LSE를 통하여 위치를 추정한다.

예를 들어, 그림 4-(b)에서 4개의 앵커노드가 있고, 3번 앵커노드는 NLOS 상황이다.  $i$  번째 앵커노드와 블라인드 노드와의 측정된 거리  $\hat{d}_i$  를 이용하여 각 앵커노드를 중심으로 원을 그린다.  $\hat{d}_1, \hat{d}_2, \hat{d}_4$  값은 LOS 상황이기 때문에 오차가 매우 적다.

따라서  $\hat{d}_1, \hat{d}_2, \hat{d}_4$  값은 각각  $\hat{d}_1^{rect}, \hat{d}_2^{rect}, \hat{d}_4^{rect}$  값보다 작다. 1번, 2번, 4번 앵커노드의 원은 설정한 사각영역 안에 있다. 하지만 장애물에 의해 큰 오차를 가지는 앵커노드 3번과 블라인드 노드사이의 측정된 거리  $\hat{d}_3$  값은  $\hat{d}_3^{rect}$  보다 크다. 따라서 3번 앵커의 원은 사각영역 밖으로 벗어나게 된다.

그러므로 우리는 3번 앵커노드가 NLOS 환경인지 알 수 있다. NLOS 상황인 앵커노드를 찾은 후, 제안한 알고리즘은 그림 4-(c)에서처럼 NLOS 상황의 거리값을 제외하고 LSE를 이용하여 블라인드 노드의 위치를 추정한다.

#### IV. 성능분석

제안한 알고리즘의 성능을 분석하기 위하여, 우리는 IEEE 802.15.4a 네트워크에 사용되는 파라미터 기반으로 시뮬레이션을 수행하였다[12,13]. 표 1은 각 연산 과정에 소모시간을 포함한 시뮬레이션에서 사용한 모든 파라미터를 보여준다.

표 1. 시뮬레이션 파라미터  
Table. 1 Simulation parameters

파라미터	값	파라미터	값	연산자	연산 시간
$T_{TA}$	8us	$E_{TX}$	75mW	float. add.	9.6us
$l_{ACK}$	23 bytes	$E_{RX}$	82.5mW	float. mul.	12us
$l_{DATA}$	$\geq 26$ bytes	$E_{active}^{mcu}$	154mW	float. div.	27us
$\mu$	250 kbps	$P_N$	-95dBm	square root	30us
$d_{max}$	120m	$P_T$	0dBm	exp.	93us
$d_0$	1m	$PL_0$	40dB		
$\eta$	2.7	$bw$	83MHz		
$\sigma_s$	2dB				

거리측정을 위하여 CSS를 이용한 TOA를 사용하였고, 이때 AWGN 표준 편차는 다음과 같이 정의된다 [11].

$$\sigma^{-1} = \pi \cdot bw \sqrt{\frac{2 P_S}{3 P_N}} \quad (11)$$

$bw$ 와  $P_S / P_N$ 은 주파수 밴드폭과 신호대 잡음비 (signal to noise ratio SNR)을 나타낸다. 우리는 일반적인 실내 전파 모델인 log-distance 경로 손실 모델을 이용한다. 거리  $d$ 에서 dB단위의 수신 신호세기는 다음과 같다.

$$P_S = P_T - PL_0 - 10\eta \log d / d_0 - X_{\sigma_s} \quad (12)$$

$P_T$ 는 전송파워,  $PL_0$ 는 기준거리  $d_0$ 에서 경로손실.  $\eta$ 는 경로 손실 지수,  $X_{\sigma_s}$ 는 표준편차  $\sigma_s$ 와 평균 0인 가우시안 분포를 가지는 랜덤변수를 나타낸다. 소모 에너지  $E$ 는 다음 수식에 의해 계산되어진다.

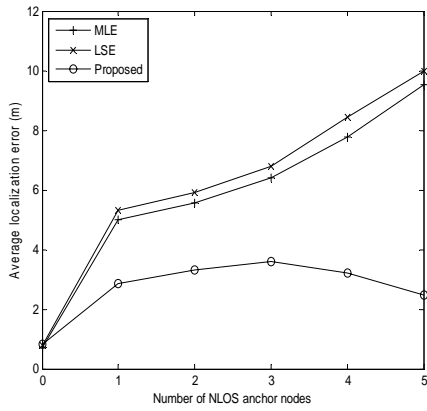
$$E = E_{TX} \times T_{DATA} + E_{RX} \times (T_{LIFS} + T_{BO} + T_{ACK} + T_{SIFS}) + E_{active}^{mcu} \times T_{OPER} \quad (13)$$

$E_{TX}$ ,  $E_{RX}$ 와  $E_{active}^{mcu}$ 는 mW 단위로 각각 전송모드, 수신모드, MCU의 동작 시에 소모되는 에너지를 나타낸다.  $T_{DATA}$ ,  $T_{ACK}$ ,  $T_{LIFS}$ ,  $T_{SIFS}$ ,  $T_{BO}$ 와  $T_{OPER}$ 는 각각 데이터 패킷 전송시간, ACK 패킷 전송시간, long inter-frame 시간, short inter-frame 시간, 백오프 시간을 나타낸다.

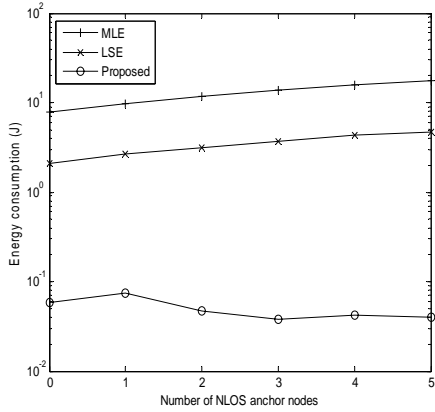
시뮬레이션에서, 우리는  $N \geq 4$ 의 앵커노드를  $50 \times 50m^2$  영역에 랜덤하게 배치 시키고, 영역의 중심 좌표 (25, 25)에 블라인드노드를 배치하였다. 우리는  $N - 4$ 개의 앵커노드를 선택하여 블라인드 노드와의 측정거리에 NLOS 오차  $b_{max} = 15m$ 를 더하였다.

그림 5-(a)는 NLOS 앵커노드의 숫자에 따른 추정 위치의 평균 오차  $\|x - \hat{x}\|$ 를 보여준다. NLOS 앵커노드는 NLOS 상황에 있는 앵커노드이다. NLOS 앵커노드 수의 증가에 따라 MLE와 LSE의 위치추정 오차는 급격히 증가한다.

그 이유는 MLE와 LSE는 NLOS 상황에 의한 오차가 큰 거리측정 값을 모두 블라인드 노드의 위치 추정에 사용하기 때문이다. MLE는 AWGN 영향을 고려하기 때문에 위치추정 오차가 LSE에 비해 약간 낮다. 시뮬레이션 상에서 우리는 블라인드가 TOA AWGN 분산 값을 알고 있다고 가정한다. 그러나 만약 블라인드 노드가 각 링크가 TOA AWGN 분산 값을 알지 못한다면, MLE의 오차는 LSE의 오차와 거의 비슷하다. 제안한 알고리즘은 NLOS 앵커노드를 감지하고 NLOS 앵커노드의 오차가 큰 거리 값을 제외하고 블라인드의 위치를 추정하기 때문에 MLE와 LSE에 비하여 위치추정 오차가 매우 적다.



(a)



(b)

그림 5. 시뮬레이션 결과  
(a) 위치추정 평균 오차 (b) 소모 에너지

Fig. 5 Simulation results

(a) Average localization error (b) Energy consumption

NLOS 앵커노드의 수가 3개 이상일 때, 제안한 알고리즘의 위치 추정 오차는 특정 값 이상으로 증가하지 않는다. 그 이유는 제안한 알고리즘의 추정 위치는 사각영역으로 제한되기 때문에 위치 추정 오차는 사각영역의 크기를 벗어나지 않는다. NLOS에 의해 측정 거리오차가 크지 않으면 사각영역의 크기는 증가하지 않는다. 측정 거리의 오차가 작을수록 사각영역의 크기는 작아진다. 시뮬레이션의 결과는 제안한 알고리즘이 NLOS 영향에 강하다는 것을 보여준다.

그림 5-(b)는 NLOS 앵커노드의 수에 따른 거리측정과 위치추정의 연산에 소모되는 에너지 성능을 결과를 보여준다. 식(4)와 식(7)에서 보듯이 LSE는 MLE보다 간단한 연산을 하기 때문에 MLE보다 적은 에너지를 소모한다. 제안한 알고리즘은 MLE와 LSE에 비해 훨씬 적은 에너지를 소모한다. 제안한 알고리즘의 거리측정패킷은 주변의 모든 앵커노드의 주소와 각 앵커노드의 ACK 패킷을 보내는 순서 정보를 포함하기 때문에, 하나의 거리측정 패킷으로 다수의 앵커노드와의 거리를 측정한다. 따라서, 기존의 거리측정방식에 비해 전송하는 패킷수를 줄임으로써 에너지를 절약할 수 있다. 그리고 제안한 알고리즘은 블라인드의 위치를 추정하는 범위를 사각영역 안으로 제한함으로써 위치추정 연산 횟수를 줄여 연산에 소모되는 에너지를 절약한다.

## V. 결론

본 논문에서 우리는 NLOS 환경에서 802.15.4a 네트워크 기반의 에너지 효율적인 위치추정 알고리즘을 제안하였다. 제안한 알고리즘은 멀티캐스트 방식을 이용하여 순차적 ACK를 보냄으로써 거리를 측정한다. 다음으로 노드의 추정위치 범위를 제한하는 사각영역 (Bounding Box)를 설정하여 NLOS 상황의 거리측정값을 제외시키고 블라인드 노드의 위치를 추정한다. 제안한 알고리즘은 NLOS 거리 값을 제거함으로써 추정위치의 정확도를 향상시켰고, 사각영역을 설정하여 추정 범위를 제한함으로써 연산에 소모되는 에너지를 줄일 수 있었다. 시뮬레이션을 통한 성능 분석은 제안된 알고리즘이 추정위치의 정확도와 에너지 소모 측면에서 기존의 알고리즘에 비하여 향상된 성능을 보여주었다.

## 감사의 글

이 논문은 국방과학연구소 선행핵심기술과제의 시제(UG110176ED) 내 외주용역비 지원을 받아 수행된 것임.



참고문헌

[ 1 ] H. Liu et al., "Survey of Wireless Indoor Positioning Techniques and Systems", IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, vol. 37, no. 6, Nov. 2007, pp. 1067-1080

[ 2 ] Yanying Gu, Anthony Lo, "A Survey of Indo or Positioning System for Wireless Personal Networks", IEEE COMMUNICATIONS SURVEYS & TUTORIALS, VOL. 11, NO. 1, FIRST QUARTER 2009

[ 3 ] 김미경, 신요순, 박현주, "AP 주변 환경 정보를 이용한 WLAN 기반 실내 위치추정 알고리즘", 한국정보통신학회논문지, 15권 5호(2011), pp.1135-1140

[ 4 ] 이좌형, 임동선, 정인범, "이동 무선 센서 네트워크에서 상호배제 기반 위치인식 기법" 한국정보통신학회논문지, 14권 6호(2010), pp.1493-1504

[ 5 ] IEEE Std 802.15.4a, "Part 15.4: wireless medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications for low-rate wireless personal area networks (WPANS) amendment 1: add alternate PHYs", <http://standards.ieee.org>, Aug. 2007

[ 6 ] I. Guvenc and C. Chong "A survey on TOA based wireless localization and NLOS mitigation techniques", IEEE Commun. Surv. Tutor., vol.11, no.3, pp.107-124, Jul., 2009.

[ 7 ] Y. Chan, W. Tsui, H. So, and P. Ching, "Time of arrival based localization under NLOS conditions", IEEE Trans. Veh. Technol., vol.55, no.1, pp.17-24, Jan. 2006

[ 8 ] S. Gezici and Z. Sahinoglu, "UWB geolocation techniques for IEEE 802.15.4a personal area networks", MERL Technical report, Cambridge, MA, USA, Aug. 2004.

[ 9 ] I. Guvenc and C. Chong, F. Watanabe, and H. Inamura, "NLOS identification and weighted least squares localization for UWB systems using multipath channel statistics", EURASIP J. Advances in Signal Processing, vol.2008, no.1,

pp.1-14, Jan. 2008.

[10] S. Venkatesh and R. M. Buehrer, "NLOS mitigation using linear programming in ultra wideband location-aware networks", IEEE Trans. Veh. Technol., vol.56, no.5, pp.3182-3198, Sep., 2007.

[11] R. Hach, "Chirp spread spectrum: latest advances", Proc. Wireless Congress 2007, Munich, Germany, Nov. 2007.

[12] STMicroelectronics, "High performance CSS transceiver enabling location awareness", <http://www.st.com>, Sep. 2008.

[13] Philips Semiconductors, "80C51 8-bit microcontroller family 4k/8k OTP/ROM low voltage (2.7V-5.5V), low power, high speed (33MHz), 128/256 BRAM", <http://www.nxp.com>, Aug. 2000.

저자소개

**차재영(Jae-Young Cha)**



2010년 건국대학교  
전자공학과 학사  
2012년 건국대학교 전자·정보  
통신공학과 석사

현재 건국대학교 전임 연구원  
※관심분야: 유비쿼터스 컴퓨팅, 무선센서네트워크,  
스마트 그리드

**공영배(Young-Bae Kong)**



2002년 고려대학교 전기공학과  
학사  
2011년 고려대학교 전기공학과  
박사

현재 한국원자력연구소 연구원  
※관심분야: 임베디드 시스템, 유비쿼터스, 무선센서  
네트워크



**최증원(Jeung-Won Choi)**

1989년 충남대학교 계산통계학과  
학사 졸업  
1993년 충남대학교 전산학과 석사  
1997년 충남대학교 전산학과 박사

1997년~현재 국방과학연구소 책임연구원  
※ 관심분야: 전술통신, 위성통신, 바이오통신, 정보  
융합



**고종환(Jong-Hwan Ko)**

2004년 서울대학교  
기계항공공학부와  
컴퓨터공학부 학사  
2006년 서울대학교  
전기컴퓨터공학부 석사

2006년~현재 국방과학연구소 연구원  
※ 관심분야: 전술통신체계, VoIP, WBAN



**권영구(Young-Goo Kwon)**

1993년 고려대학교  
전기공학과 학사  
1996년 고려대학교  
전기공학과 석사

2002년 Department of Electrical and Computer  
Engineering, University of Florida 박사  
2002년 ~ 2003년 삼성전기 중앙연구소 책임연구원  
현재 건국대학교 전자공학과 부교수  
※ 관심분야: 유비쿼터스, 무선센서네트워크, 스마트  
그리드