

# 무선 센서 네트워크에서 반복적인 Path-Loss Exponent 추정을 통한 위치추정 기법

최준호\*, 최재각\*, 유상조<sup>o</sup>

## Positioning Scheme Based on Iterative Path-Loss Exponent Estimation in WSNs

Jun-Ho Choi\*, Jae-Kark Choi\*, Sang-Jo Yoo<sup>o</sup>

### 요 약

무선 센서 네트워크에서 수신 신호 세기를 이용한 위치추정 방식은 다수의 저전력 노드로 구성된 센서네트워크에 적합한 방법 중의 하나로 고려되고 있다. 수신 신호 세기를 이용한 위치추정 방식의 오차를 줄이기 위해서는 적절한 경로 감쇄 지수 (path-loss exponent, PLE)의 추정이 요구된다. 기존의 위치 추정 방식은 자신의 위치를 알고 있는 각각의 앵커가 인접한 앵커들을 참조하여 PLE를 측정하고, 자신의 위치를 알고자 하는 센서 노드는 수신 신호 세기를 기반으로 가장 인접한 앵커를 판별한 후, 해당 앵커가 측정한 PLE를 자신의 위치 추정에 이용하는 방식을 취하고 있다. 이때의 PLE는 인접한 앵커의 위치에서 측정된 것이기 때문에 실제 측정한 위치에서만 높은 신뢰성을 가지며, 그 외의 위치에서는 다른 값을 갖는 경우가 일반적이다. 따라서 인접한 앵커들을 참조하여 측정한 PLE를 센서 노드의 위치 추정에 직접적으로 이용하는 것은 위치 추정 시 오차를 발생 시키는 주요 원인이 된다. 본 논문에서는 센서 노드 스스로가 각각의 인접한 앵커들에 대한 PLE를 추정하고, 이를 이용하여 센서 노드의 위치를 추정하는 기법을 다루며, 특히, 추정된 센서 노드의 위치에서 각 앵커들까지의 거리를 기반으로 PLE를 반복적으로 재추정하도록 하여 위치 추정 오차를 줄이도록 하는, 반복 PLE 추정을 통한 위치 추정 기법을 제안한다. 성능평가에서는 제안된 기법이 기존의 방법보다 위치 추정 오차를 줄일 수 있음을 보였다.

**Key Words** : received signal strength, positioning, localization, wireless sensor network

### ABSTRACT

In wireless sensor networks, the positioning scheme using received signal strength (RSS) has been widely considered. Appropriate estimation of path-loss exponent (PLE) between a sensor node and an anchor node plays a key role in reducing position error in this RSS-based positioning scheme. In the conventional researches, a sensor node directly uses the PLEs measured by its nearest anchor node to calculate its position. However, the actual PLE between a sensor node and the anchor node can be different from the PLE measured by its nearest anchor node. Thus, if a sensor node directly uses the PLEs measured by its nearest anchor node, the estimated position is different from the actual position of the sensor node with a high probability. In this paper, we describe the method how a sensor node estimates PLEs from the anchor nodes of interest by itself and

※ 본 연구는 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초사업연구임(No.2011-0021152).

\* 주저자 : 인하대학교 정보통신공학과 멀티미디어 통신망 연구실, jhchoi86@inha.edu, 준회원

<sup>o</sup> 교신저자 : 인하대학교 정보통신공학과 멀티미디어 통신망 연구실, sjyoo@inha.ac.kr, 종신회원

\* 인하대학교 정보통신 대학원, 멀티미디어 통신망 연구실, jkc@inha.edu, 정회원

논문번호 : KICS2012-05-267, 접수일자 : 2012년 5월 29일, 최종논문접수일자 : 2012년 10월 4일

calculates its position based on these self-estimated PLEs. Especially, our proposal suggests the mechanism to iteratively calculate the PLEs depending on the estimated distances between a sensor node and anchor nodes. Based on the recalculated PLEs, the sensor node reproduces its position. Through simulations, we show that our proposed positioning scheme outperforms the traditional scheme in terms of position error.

## I. 서 론

유비쿼터스 환경에서 무선 센서 네트워크는 저전력으로 동작하며 지속적으로 주위환경에 대한 정보를 수집하여 사용자가 이를 적절히 활용하도록 한다. 무선 센서 네트워크는 저비용, 저전력으로 동작하기 때문에, 매우 정밀한 위치정보를 요구하지는 않지만 오차가 적다면 그만큼 신뢰할 수 있는 정보를 제공할 수 있게 된다. 무선 센서 네트워크에서 노드의 위치를 추정하는 기법은 크게 거리 기반(range-based) 기법과 비거리기반(range-free) 기법으로 나눌 수 있다.

GPS(Global Positioning System)는 대표적인 거리기반 방식으로 높은 전력을 소모하며 정확한 위치 추정을 위해 고가의 장치를 필요로 한다. 또 다른 거리 기반 기법으로는 센서 노드가 송/수신하는 신호의 도착시간의 차이를 이용하는 TDOA(Time Difference Of Arrival)<sup>[1]</sup>, 단순히 신호의 도착시간을 이용하는 TOA(Time Of Arrival)<sup>[2]</sup>, 신호의 방향각을 이용하여 각도를 추정하고 이를 이용하는 AOA(Angle Of Arrival)<sup>[3]</sup> 등이 있다.

비거리 기반 위치추정 알고리즘으로는 인접한 센서 노드와의 정보 교환을 통해 센서 노드가 임의의 세 앵커들로 구성된 삼각형 내부에 존재하는 지 여부를 판단하도록 하는 APIT<sup>[4]</sup> 알고리즘과 앵커로부터의 홉 거리 정보를 이용하는 DV-hop<sup>[5][6]</sup> 알고리즘 등이 있다.

거리 기반 방식 중 수신 신호 세기 (received signal strength, RSS)를 이용한 방식은 비교적 간단한 원리를 이용하기 때문에 무선 센서 네트워크에 적합하다. RSS를 통해 예측된 거리에 영향을 주는 주된 요소는 환경에 따라 변하는 경로 감쇄 지수 (path-loss exponent, PLE) 값 이다. 기존의 PLE추정을 통한 위치 추정방법들<sup>[7,8]</sup>은 센서 노드와 앵커 간 경로 상의 PLE를 직접 추정하는 것이 아니라 앵커들 간의 참조를 통해 획득한 PLE를 센서 노드의 위치 추정에 곧바로 이용하고 있다.

본 논문에서는 센서 노드와 앵커 간 경로상의 PLE를 직접 추정하고 센서 노드 스스로가 PLE 추정과 위치 추정을 반복적으로 수행함으로써, 위치

추정의 오차를 줄일 수 있도록 하는 PLE 추정을 통한 위치 추정 기법을 제안한다. 제안된 방법은 PLE 추정과 위치 추정을 반복적으로 수행하는 와중에, 이전에 추정된 PLE에 가중치를 부여하여 새로운 PLE를 추정하는 방식을 취하며, 이때의 가중치는 이전에 추정된 위치와 앵커들 간의 거리 비에 따라 적용되는 방식을 취한다.

2장에서는 관련연구를 통해 앞에서 말한 기존의 PLE추정방식에 대한 문제점을 분석한다. 3장에서는 본 논문에서 제안하는 센서 노드와 각 앵커들 간의 반복적 PLE 추정을 통한 위치추정 기법을 소개 한다. 4장에서는 모의실험을 통해 기존의 알고리즘과 제안된 기법의 성능을 비교하고 결과를 분석하고, 5장에서는 본 논문의 결론을 맺는다.

## II. 기존의 PLE 추정 및 위치 추정 기법

본 장에서는 거리 기반 방식을 통한 위치 추정 기법의 원리와 기존의 PLE 추정방식을 이용하는 위치 추정 알고리즘을 소개한다. 그리고 기존의 PLE추정방식의 문제점을 분석한다.

### 2.1. 수신 신호 세기를 통한 위치 추정 원리

수신 신호 세기 측정을 통한 거리기반 위치 추정 방법은 자신의 위치를 모르는 센서가 자신의 위치를 알고 있는 앵커로부터 받는 수신 신호 세기를 이용하여 자신과 각 앵커들 간의 거리를 계산하고 이를 바탕으로 자신의 위치를 추정하는 방법을 일컫는다. 임의의 앵커로부터 거리  $d$  만큼 떨어져 있는 센서 노드의 수신 신호 세기는 다음식과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_r(d) = \frac{P_t \cdot G_t \cdot G_r}{L} \left( \frac{\lambda}{4\pi \cdot d_0} \right)^2 \left( \frac{d_0}{d} \right)^\beta \quad (1)$$

이때,  $P_t$ 는 앵커의 송신 신호 세기,  $G_t$ 는 송신 안테나 이득,  $G_r$ 은 수신 안테나 이득,  $\lambda$ 는 파장,  $d_0$ 는 기준거리,  $L$ 은 송수신 회로 손실 (losses through transmit/receive circuitry),  $\beta$ 는 경로 감쇄

지수를 의미한다. 시스템에 의해 결정되는 상수 값들을 제외 하면 식(1)은 다음 식(2)와 같이 표현될 수 있다.

$$P_r = P_t \cdot K \cdot \left(\frac{1}{d}\right)^\beta \quad (2)$$

식 (2)를 통해 알 수 있듯이 수신 신호 세기에 영향을 주는 주요 요소는 거리  $d$  와 경로 감쇄지수  $\beta$  이다. 즉 센서 노드에서 측정된 수신 신호 세기를 이용하여 거리를 알기 위해선 올바른 경로 감쇄지수가 결정 되어야 한다. 일반적으로 센서노드는 자신의 위치를 모르기 때문에 거리와 경로 감쇄지수를 스스로 결정할 수 없다. 이런 경우 경로 감쇄지수를 결정하기위해 주변에 자신의 위치를 알고 있는 앵커 노드의 도움을 받아 경로 감쇄지수를 추정한다. 이때 획득한 경로 감쇄지수는 센서 노드가 직접 계산하여 얻은 값이 아니기 때문에 센서노드와 앵커 노드사이의 거리에 오차가 발생 하게 된다. 따라서 올바른 경로 감쇄지수를 결정하는 것은 센서 노드의 위치 추정에 중요한 요소다.

센서 노드는 경로 감쇄지수의 추정을 통해 하나의 앵커로부터 거리를 결정할 수 있으며, 이와 동일한 방법으로 세 개 이상의 앵커로부터 거리를 추정하게 되는 경우, 삼각법을 이용하여 자신의 위치를 결정 할 수 있다. 이상에서 설명한 방식이 수신 신호 세기 측정을 통한 거리기반 위치 추정 기법의 원리이다.

## 2.2. 기존의 PLE 추정방식의 알고리즘

본 논문에서는 PLE 추정을 통한 기존의 위치추정 알고리즘으로서 [7]의 방식을 고려하였다. [7]에서는 자신의 위치를 알고 있는 앵커, 자신의 위치를 알고 있으며 신호가 수신되는 앵커들로부터의 PLE를 계산할 수 있는 경로 감쇄 측정 노드 (path loss estimation node, PN), 자신의 위치를 알고자 하는 미지 노드 (blind node) 등 세 가지 종류의 노드를 고려하고 있다. 미지 노드는 각각의 앵커 혹은 경로 감쇄 측정 노드의 비컨을 수신한 후, 수신 신호 세기가 가장 큰 노드를 선택하여 해당 노드로부터 제공되는 PLE 정보를 토대로 앞 절에서 설명한 방식을 이용하여 자신의 위치를 추정한다. 이 경우, 각 앵커 및 경로 감쇄 측정 노드가 제공하는 PLE는 각각이 인접한 앵커 노드를 참조하여 획득한 PLE들을 평균한 값에 해당한다.

그림1과 같이 경로 감쇄 측정 노드  $A_1$ 과 세 개의 앵커  $A_2, A_3, A_4$  및 미지 노드  $U$ 가 존재하는 상황을 가정하면, 미지 노드  $U$  는 수신 신호 세기가 가장 크게 측정된 노드로서 경로 감쇄 측정 노드  $A_1$  을 선택하고,  $A_1$ 이 제공하는 평균 PLE를 이용하여, 각 앵커 및 경로 감쇄 측정 노드로부터 거리를 계산한 후, 이를 토대로 자신의 위치를 추정한다.  $\beta_{A_i, A_j}$ 를  $A_i$ 가 전송할 때  $A_j$ 가 측정한 PLE라 하고,  $A_i$ 가  $U$ 에게 제공한 PLE를  $\overline{\beta_{A_i}}$ 라 하면, 이들은 각각 다음 식 (3), (4)와 같이 구할 수 있다.

$$\beta_{A_i, A_j} = \frac{P_r(d_{A_i, A_j})[dB] - P_r(d_0)[dB]}{10 \log_{10}(d_0/d_{A_i, A_j})} \quad (3)$$

$$\overline{\beta_{A_i}} = \frac{\sum_{c \in N_i} \beta_{c, A_i}}{|N_i|} \quad (4)$$

$N_i$  는  $A_i$ 가 수신 신호 세기를 측정한 앵커 및 경로 감쇄 측정 노드의 집합을,  $|N_i|$ 는 집합  $N_i$ 에 속한 원소의 개수를 나타낸다. 따라서 식(4)는  $A_i$ 가 측정한 경로 감쇄지수의 평균을 나타낸다. 그리고  $d_{A_i, A_j}$ 는 두 노드  $A_i$  와  $A_j$  사이의 거리를 의미한다.

수신신호세기를 이용하여 앵커간의 거리나 앵커와 센서노드 사이의 거리를 계산하기 위해서는 경로감쇄지수를 알아야 한다. 반대로 경로 감쇄지수를 알기 위해서는 두 지점 사이의 거리를 알아야한다. 그림 1에서 센서 노드  $U$  와 앵커  $A_1$ 사이의 거리를 계산하기 위해서는 경로 감쇄지수를 필요로 하지만 센서노드  $U$ 는 자신의 위치를 모르기 때문에 앵커 사이의 거리를 계산할 수 없다. 따라서 일반적으로 인접한 지역에서는 비슷한 채널환경이 구성되어 있을 가능성이 높은 성질을 이용하여  $A_1$  주변에 자신의 위치를 알고 있는 앵커들을 이용하여 경로 감쇄지수를 추정한다. 그림 1의 경우 앵커  $A_1$ 에 인접한 앵커들( $A_2, A_3, A_4$ )간에 경로 감쇄지수를 추정하여 평균값을 센서노드  $U$ 의 경로 감쇄지수 값으로 지정하고 이 값을 이용하여  $A_1$ 과의 거리를 계산하게 된다. 즉,  $A_1$ 이  $U$ 에게 제공한 경로 감쇄지

수는  $\overline{\beta_{A_1}} = (\beta_{A_2,A_1} + \beta_{A_3,A_1} + \beta_{A_4,A_1})/3$  이 된다.

이와 같이 위치를 찾으려는 센서 노드는 자신의 위치를 모르기 때문에 직접 PLE를 계산 할 수 없으므로, 주변에 위치를 아는 앵커들의 도움을 받는다. 이러한 방식에서 적용되는 PLE 값은 센서 노드와 앵커간의 경로상의 PLE가 아니라 앵커들 간의 참조를 통해 획득된 PLE이며, 센서 노드의 위치 추정에 이용되는 앵커들 각각에 대해 단일화된 PLE를 이용하였다.

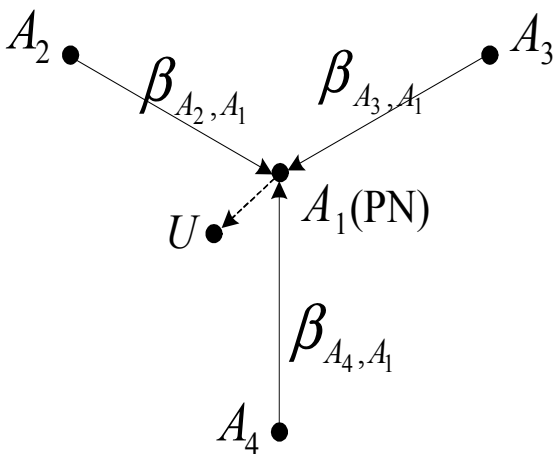


그림 1. 기존 PLE 추정 기법의 시나리오  
Fig. 1. Conventional PLE estimation scenario

이 경우 위치를 찾으려는 센서 노드가 이용하는 PLE는 인접한 앵커의 위치에서 추측된 것이기 때문에 추측한 위치에서만 신뢰성을 얻을 수 있고 그 외의 위치에서는 올바른 값인지 알 수 없다. 즉, 추측된 PLE는 PLE값을 측정할 송, 수신단의 위치에서만 정확한 값이기 때문에 그 외의 위치에서 적용하기에는 무리가 있다. 하지만 기존의 기법은 이와 같은 문제점을 고려하지 않고 통신 범위 안에 있는 주변 앵커들로부터 추측된 모든 PLE의 평균값을 적용하여 센서 노드의 PLE로 사용하였다. 센서 노드는 주변 앵커와 자신의 거리를 계산하기 위해 단일화된 PLE를 사용하게 된다. 이는 위치 추정시 오차를 발생 시키는 주요 요소라 할 수 있다.

### III. 반복적 PLE 추정을 통한 위치 추정 기법

본 장에서는 본 논문에서 제안된 기법을 소개한다. 제안된 기법에서는 센서 노드가 임의의 세 앵커들로 구성된 적절한 삼각형 내부에 위치하는 상황

에서 반복적으로 PLE 추정과 위치 추정을 수행하며, 이를 통해 위치 추정의 오차를 줄이는 것을 목적으로 한다. 센서 노드가 임의의 세 앵커들로 구성된 삼각형의 내부에 위치하는가를 판별하기 위한 방법으로는 기존의 APIT 알고리즘<sup>[4]</sup>을 이용하였으며, 자신이 포함된 삼각형이 여러 개 존재하는 상황에서 PLE의 추정에 가장 적합한 삼각형을 선택하는 문제를 함께 고려하였다.

#### 3.1. 시스템 모델

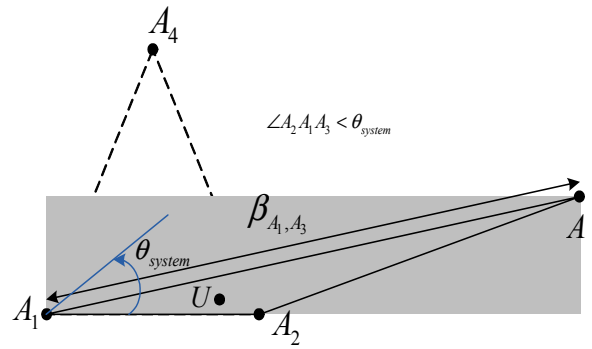
센서 네트워크는 자신의 위치를 알고 있는 앵커와 자신의 위치를 알고자 하는 미지 노드로 구성되어 있다. 상호간에 신호의 수신이 가능한 임의의 두 앵커들은 서로간의 경로 감쇄지수를 사전에 알고 있는 것으로 간주한다. 임의의 세 앵커 ( $A_i, A_j, A_k$ )들로 구성된 삼각형과 해당 삼각형 내부에 위치한 임의의 센서 노드  $U$ 를 고려하는 경우,  $A_i$ 의 전송 시 센서 노드  $U$ 에 적용될 PLE는  $\beta_{A_i,A_j}$ 와  $\beta_{A_i,A_k}$ 의 가중 합으로 표현이 가능하며 멀리 떨어진 앵커보다 가까이 있는 앵커와 PLE환경이 비슷한 것으로 가정한다.  $\beta_{A_i,A_j}$ 와  $\beta_{A_i,A_k}$ 의 가중 합에 의한  $\beta_{A_i,U}$ 의 범위는  $\min(\beta_{A_i,A_j}, \beta_{A_i,A_k}) \leq \beta_{A_i,U} \leq \max(\beta_{A_i,A_j}, \beta_{A_i,A_k})$ 로 표현될 수 있다. 이는 실제의 환경과는 다를 수 있으나, 본 논문에서는 각 앵커들 간의 정보 교환만을 기반으로 획득할 수 있는 최대한의 정보로서 이 같은 상황을 고려하였다.

#### 3.2. PLE 추정을 위한 최적 삼각형 선택

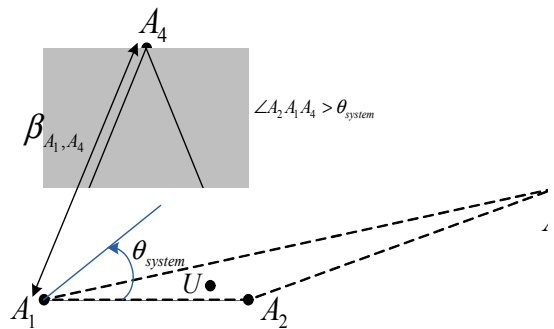
센서 노드는 인접한 앵커들의 위치 정보를 비콘 (beacon)과 같은 메시지의 수신을 통해 획득 할 수 있으며, APIT<sup>[4]</sup> 알고리즘을 통해 자신이 특정 앵커들로 구성된 삼각형의 내부에 위치하는 지 여부를 알 수 있다. APIT 알고리즘은 센서 노드가 임의의 방향으로 이동할 때 세 점으로부터 모두 멀어지거나 가까워지는 경우가 발생하면 세 점으로 구성된 삼각형의 외부에 존재한다고 판단하게 된다. 반대로 임의의 이동 방향에 대해 멀어지거나 가까워지지 않는 경우가 발생한다면 삼각형 내부에 존재한다고 판단하게 된다. 무선 센서 네트워크에서 센서는 이동시킬 수 없기 때문에 인접한 센서들과의 정보 교환을 통해 APIT 알고리즘을 수행하게 된다. 예를 들어 센서노드  $U$ 가 특정앵커로부터 받는 수신신호

세기와  $U$ 의 인접한 센서에서 같은 앵커로부터 받은 수신신호세기를 비교했을 때  $U$ 의 수신신호세기가 더 크면 인접한 센서는 앵커로부터 더 멀리 떨어져 있다고 판단하고 반대로  $U$ 의 수신신호세기가 더 작다면 인접한 센서가 앵커로부터 더 가까이 있다고 판단하게 된다. 이를 통해  $U$ 는 인접한 센서로의 방향이 특정앵커와 가까워지는지 멀어지는지 알 수 있다. APIT 알고리즘이 정확하게 적용되기 위해서는 여러 방향에 대한 앵커와 센서노드  $U$ 사이의 거리 변화를 알아야 한다. 따라서 센서노드의 밀도가 높을수록 APIT 알고리즘의 신뢰성은 증가한다.

APIT 알고리즘을 적용하면 위치를 찾으려는 노드를 포함하고 있는, 복수의 삼각형들이 결정된다. 본 논문에서는 이 삼각형들 중에서 최소각도가  $\theta_{system}$  이상인 삼각형들 중에 가장 작은 넓이를 보이는 삼각형을 최적의 삼각형으로 선택하였다. 이때  $\theta_{system}$ 는 시스템에서 주어지는 값으로 간주한다. 이와 같은 각도 조건이 필요한 이유는 앵커간의 거리가 두 지점사이의 정확한 PLE추정에 영향을 주기 때문이다. PLE를 측정하는 두 지점 사이에 채널 환경이 어떻게 주어질지 예상 할 수가 없다. 즉, 거리가 먼 경우 앵커간의 추정을 통해 얻은 PLE값은 정확도가 낮을 것이고 앵커간의 거리가 짧을수록 수신 신호 세기를 이용하여 얻은 PLE값은 정확도가 증가할 것이다. 그림 2를 예로 들면, 자신의 위치를 알고자 하는 미지 노드  $U$ 는 삼각형  $\triangle A_1A_2A_3$ 와  $\triangle A_1A_2A_4$ 의 내부에 존재한다. 만약 최소 각도 조건이 적용되지 않고 최소 넓이 조건만 적용된다면 넓이가 더 작은 삼각형  $\triangle A_1A_2A_3$ 가 최적삼각형으로 선택될 것이다. 삼각형  $\triangle A_1A_2A_3$ 의 경우,  $A_1$ 과  $A_3$  사이의 거리가 매우 멀기 때문에 측정된 PLE가 경로 상에서 일관되지 않을 확률이 크다. 따라서 이러한 PLE를 두 지점 근방에 위치한 센서 노드에게 적용한다면, 추정된 위치에 대한 불확실성이 증가하게 될 것이다. 이에 반해 삼각형  $\triangle A_1A_2A_4$ 의 경우, 삼각형  $\triangle A_1A_2A_3$ 에 비해 넓이는 더 크지만 극단적으로 멀리 떨어져있는 앵커가 존재 하지 않기 때문에 수신신호 세기에 의한 PLE추정 값의 오차는 상대적으로 크지 않을 것이다. 이와 같이 넓이는 작지만 멀리 떨어져있는 앵커를 포함한 세 개의 앵커를 최적 삼각형으로 선택하지 않기 위해 최소 각도 조건



(a) Example of using area condition



(b) Example of using area and angle conditions

그림 2. 최적 삼각형 결정을 위한 넓이 및 각도 조건  
Fig. 2. Area and angle conditions for optimal triangle decision

을 적용하였다.

본 논문에서는 APIT 알고리즘이 성능평가에 많은 영향을 줄 것으로 판단하여 센서 노드의 밀도를 다양하게 하여 실험을 진행하였고 최소 각도 조건은  $\theta_{system} = 30^\circ$ 으로 적용 하였다. 이하에서는 이러한 시스템의 각도 조건을 만족하면서 면적이 가장 작은 삼각형을 구성하는 앵커들을 각각  $A_1^*, A_2^*$  그리고  $A_3^*$ 로, 노드  $i$ 와 임의의 두 점  $j, k$ 를 잇는 선분과의 거리를  $d_{j,k,i}$ 로 표기 한다.

### 3.3. 반복적 PLE 추정 및 위치 추정

그림 3은 3.2절에서의 최적 삼각형이 선택된 이후, 센서 노드  $U$ 가 제안하는 방법을 통해 자신의 위치를 추정하는 시나리오를 보인다. 위치를 찾으려는 센서 노드  $U$ 는 세 앵커인  $A_1^*, A_2^*$ 와  $A_3^*$ 로부터  $\beta_{A_1^*,U}$  및  $\beta_{A_2^*,U}$ 와  $\beta_{A_3^*,U}$ 를 다음과 같은 과정을 통해 추정한다.

Step 1) 그림4 과 같이 센서 노드  $U$ 는 초기에

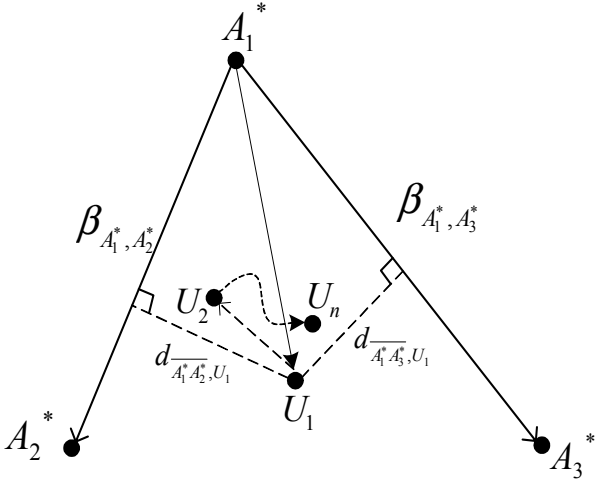


그림 3. 제안하는 방법의 시나리오  
Fig. 3. Proposed method

$A_1^*$  으로부터 획득한  $\beta_{A_1^*,A_2^*}$  와  $\beta_{A_1^*,A_3^*}$ 를 평균한 값을  $\beta_{A_1^*,U}$  로 취한다.  $A_2^*$  와  $A_3^*$ 에 대해서도 동일한 방법으로  $\beta_{A_2^*,U}$  와  $\beta_{A_3^*,U}$  을 취한다.

Step 2) 센서 노드  $U$ 는 추정된  $\{ \beta_{A_1^*,U}, \beta_{A_2^*,U}, \beta_{A_3^*,U} \}$ 와 각 앵커로부터의 RSS를 이용하여, 평균 제곱 오차를 최소화하는 방식으로 자신의 위치  $U_n = (x_n, y_n)$ 을 추정한다<sup>[9]</sup>. 이때,  $n$  은 초기의 경우(Step 1의 직후),  $n=1$ 이며, 이후 Step 3 를 거칠 때 마다 1씩 증가한다.

Step 3)  $U$ 는  $\beta_{A_1^*,U}$ 를 갱신하기 위해, 자신의 현재 위치로 추정된  $U_n$ 으로부터 선분  $\overline{A_1^*,A_2^*}$  및  $\overline{A_1^*,A_3^*}$ 까지의 거리 (즉,  $d_{A_1^*,A_2^*,U_n}$  및  $d_{A_1^*,A_3^*,U_n}$ )를 이용하여,  $\beta_{A_1^*,U}$ 의 계산에 관여한  $\beta_{A_1^*,A_2^*}$  및  $\beta_{A_1^*,A_3^*}$ 에 가중치를 두어  $\beta_{A_1^*,U}$  를 다음과 같이 갱신한다.

$$\beta_{A_i^*,U} = v \cdot \beta_{A_i^*,A_j^*} + w \cdot \beta_{A_i^*,A_k^*}, \quad (5)$$

$$\text{where } v = \frac{d_{A_i^*,A_k^*,U_n}}{d_{A_i^*,A_j^*,U_n} + d_{A_i^*,A_k^*,U_n}} \quad (6)$$

$$\text{and } w = \frac{d_{A_i^*,A_j^*,U_n}}{d_{A_i^*,A_j^*,U_n} + d_{A_i^*,A_k^*,U_n}} \quad (7)$$

식 (6) 및 식 (7)의  $v, w$ 는  $v+w=1$ 의 관계를 만

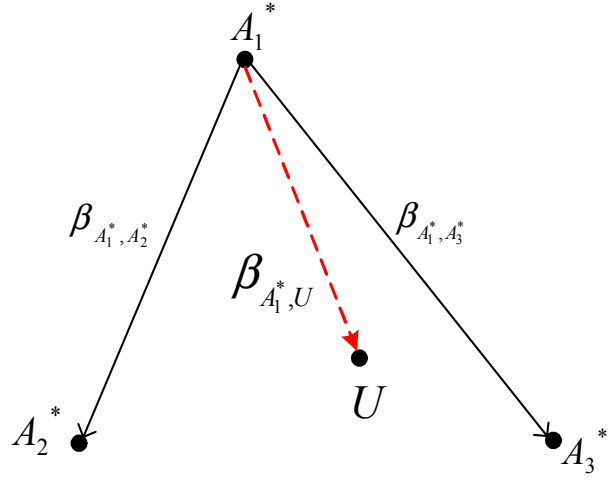


그림 4. 앵커  $A_1^*$ 과 센서 노드  $U$ 사이의 PLE 추정 과정  
Fig. 4. Estimation of PLE between  $A_1^*$  and  $U$

족하며, 이는 보다 멀리 떨어진 선분의 PLE에 대해 상대적으로 보다 작은 가중치를 부여하는 것을 의미한다.  $\beta_{A_2^*,U}$  및  $\beta_{A_3^*,U}$ 에 대해서도 동일한 과정을 수행한 후, 갱신된 PLE 정보를 기반으로 Step 2에서와 같은 방법으로 자신의 재추정위치  $U_{n+1} = (x_{n+1}, y_{n+1})$ 를 구한다.

Step 4) Step 3의 과정을 다음의 조건을 만족할 때까지 반복적으로 수행한다.

$$d_{U_n, U_{n+1}} \leq \epsilon \quad (8)$$

이때,  $\epsilon$  값은 시스템에 의해 주어지는 값이다. 만일 APIT 알고리즘이 낮은 센서 노드 밀도 등의 이유로 신뢰성이 떨어지는 경우에는 센서 노드가 위의 조건을 만족하기 전에 삼각형의 외부로 벗어나게 되는 경우가 발생할 수 있다. 그러한 경우에는 더 이상 반복 수행을 하지 않고, 바로 이전에 추정된 위치를 최종적으로 추정된 위치로 간주한다.

그림 5는 이상의 제안된 기법을 의사코드로 표현한 것이다. 시스템 모델에서 주어진 조건을 만족하는 세 개의 앵커노드는 사전에 선택된 상황을 고려하였다.

#### IV. 실험

본 장에서는 본 논문에서 제안하는 기법의 성능을 평가하고, RSS를 기반으로 한 다른 기법과 비교하였다. 이를 위해 java를 이용하여 시뮬레이션 환



경을 구현하였고, 평균 오차거리와 그에 따른 히스토그램을 통해 제안된 기법의 성능을 평가하고, 기존의 다른 기법과 비교를 수행하였다.

4.1. 실험 환경

실험은 100m×100m의 무선 센서 네트워크 환경을 고려하였으며, 그림 6과 같이 Voronoi Diagram<sup>[10]</sup>을 이용하여 실험공간의 구역을 나누고 구역마다 임의의 PLE값을 설정하였다. 그림 6-(a)와 같이 각각의 구역에 설정된 PLE값은 구역마다 무선채널환경이 다른 경우를 나타내기 위한 실험 환경으로 인접한 구역 사이에 PLE값의 차이가 최소 0.5에서 최대 1만큼 발생하도록 설정하였다. 실험 공간은 3구역 및 4구역으로 나누어진 경우를 각각 고려하였으며, 공간 내 앵커 노드의 개수는 18개로 고정하였다.

그 밖의 실험변수로서, 앵커의 송신전력은  $P_t = 0dBm$ , 주파수는 2.4GHz를,  $G_t=G_r=L=1$ ,  $d_0=1m$ 를 사용하였으며,  $\epsilon=2m$ 를 적용하였다. 임의의 센서 노드는 앵커가 전송한 메시지에 대해 수신 신호세기가  $-100dBm$ 보다 클 때에 만 해당 앵커로부터 메시지를 수신할 수 있다고 가정하였다.

제안하는 방법은 APIT알고리즘을 사용한다. APIT알고리즘은 센서 노드의 밀도에 영향을 받기 때문에 그에 따른 영향을 확인하기 위한 실험이 필요하다. 따라서 실험 공간 내 센서 노드의 수는 50개, 100개, 200개, 300개 그리고 400개의 5가지 경우를 고려하였다. 밀도가 낮은 50개의 센서 노드부터 가장 밀도가 높은 400개의 센서노드까지 다양하게 실험을 진행하여 제안된 알고리즘의 성능을 평가하였다. 그림7은 4개 구역으로 나누어진 실험 공간에 200개의 센서노드를 랜덤하게 분포시킨 예이다. 검은 점이 앵커노드이고 빨간 점이 센서 노드를 나타낸다.

앵커로부터 d 만큼 떨어진 노드의 수신 전력은, 송수신기의 안테나이득, 파장 및 시스템 손실 등의 요소를 포함하는 상수 k를 이용하여  $P_r(d) = k(d)^{-\beta} P_t$  에 의해 구해지며, 앵커와 수신 노드의 직선 경로가 Voronoi Diagram 상에서 둘 이상의 PLE 공간을 통과하는 경우, 각 공간에서의 PLE에 의해 감쇄되는 전력을 추적하여 수신 단에서의 전력을 산출하도록 하였다.

```

input  $A_1^*, A_2^*, A_3^*$  // selected three anchor nodes
input  $U$  // unknown node.

FOR ALL  $i$ , where  $i \neq j \neq k$  and  $i, j, k \in \{1, 2, 3\}$ ,

    calculate  $\beta_{A_i, A_j}$  and  $\beta_{A_i, A_k}$  based on the RSS
    between anchor nodes.
    obtain the initial  $\beta_{A_i, U}$ ,

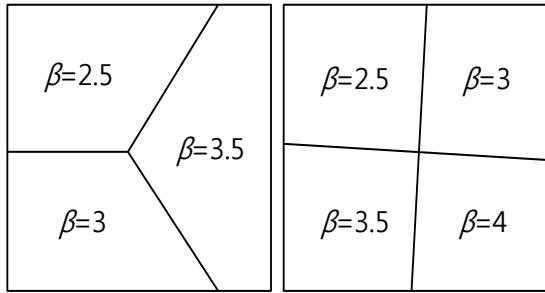
$$\beta_{A_i, U} = \frac{1}{2}(\beta_{A_i, A_j} + \beta_{A_i, A_k}).$$

END FOR

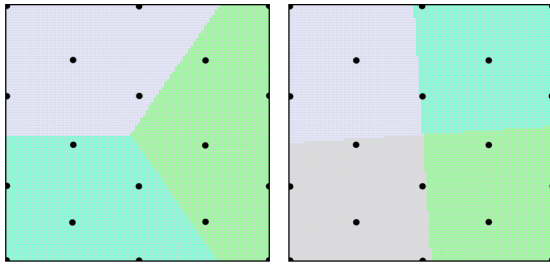
initialize counter  $n$  is one.
initialize weight factors  $v_i$  and  $w_i$  are zeros, where
 $i = \{1, 2, 3\}$ .
find  $U_n$  by using  $\beta_{A_i, U}$ , where  $i = \{1, 2, 3\}$ .

WHILE(1)
    FOR ALL  $i$ , where  $i \neq j \neq k$  and  $i, j, k \in \{1, 2, 3\}$ ,
        calculate weight factor  $v_i, w_i$  based on the
        distances from  $U_n$  and
        the lines  $\overline{A_i, A_j}$  and  $\overline{A_i, A_k}$  by using eq. (6)
        and (7).
        update  $\beta_{A_i, U}, \beta_{A_i, U} = v_i \beta_{A_i, A_j} + w_i \beta_{A_i, A_k}$ 
        as in eq. (5).
    END FOR
    save temporal position of  $U, U_{tmp} = U_n$ .
    increase counter  $n, n = n + 1$ .
    find position of  $U_n$  based on  $\beta_{A_i, U}$ , where  $i = \{1, 2, 3\}$ .
    IF  $U_n$  is outside of the area  $\triangle A_i A_j A_k$ ,
        display  $U$ 's final position is  $U_{tmp}$ .
        BREAK.
    END IF
    IF distance between  $U_n$  and  $U_{tmp}$  is less than  $\epsilon$ ,
        display  $U$ 's final position is  $U_n$ .
        BREAK.
    END IF
ENDWHILE
    
```

그림 5. 제안하는 방법의 의사코드  
Fig. 5. Pseudo code of proposed scheme



(a) 영역별  $\beta$  값



(b) 고정된 앵커의 위치

그림 6. 100m×100m 실험 공간  
Fig. 6. 100m×100m experiment field

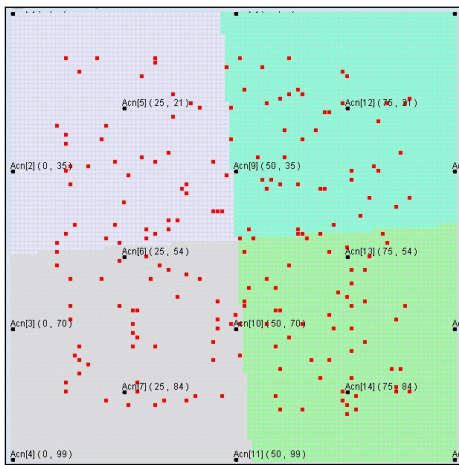


그림 7. 센서를 랜덤하게 분포 시킨 예  
Fig. 7. Randomly distributed sensors

제안된 반복적 위치 추정 기법은 앵커들로부터 반복적으로 메시지를 수신할 필요가 없으며, 한번 앵커들로부터 메시지를 수신한 노드는 내부적으로 반복 연산을 수행하는 방법을 취한다. 따라서 반복 연산 횟수가 큰 경우에는 노드의 위치 추정 과정에서 상대적으로 큰 지연이 수반될 수 있다. 그러나 제안된 알고리즘은 식 (8)의 조건에 의해, 알고리즘의 반복 횟수를 간접적으로 제어하고 있기 때문에, 불필요한 반복 연산이 위치 추정의 지연에 미치는

영향을 최소화하도록 하고 있다. 실험에서는 대부분의 센서 노드가 3-4회의 반복 연산을 수행하며, 관찰된 최대 반복 연산 횟수는 10회이다.

기존의 방법에서는 경로 감쇄 측정 노드(PN)가 앵커와 마찬가지로 인접한 앵커들로부터 획득한 PLE를 위치를 알고자 하는 센서 노드에게 제공하는 역할을 하는 것을 고려하여, 경로 감쇄 측정 노드 역시 자신의 위치를 알고 있는 앵커와 동일하게 취급하였다.

#### 4.2. 성능 평가

그림 8은 영역을 3개로 나누는 실험 환경에서 센서 노드 수에 따른 평균오차를 나타낸다. 센서 노드의 수와는 무관하게 제안된 기법이 기존의 방법보다 더 작은 평균 오차거리를 갖는다는 것을 알 수 있다. 기존의 기법은 전체적으로 약 8.3m의 평균오차 거리를 보였고 제안된 기법은 약 3m의 평균 오차 거리를 보인다.

그림9는 영역이 4개일 때의 결과를 보여준다. 영역수가 증가하는 것은 무선채널환경이 다양해짐을 의미한다. 즉 영역 수가 많을수록 장애물이나 무선 채널환경에 영향을 주는 요소가 많은 경우로 간주할 수 있으며, 그에 따라 전체적으로 오차거리가 늘어나는 것을 확인할 수 있다.

기존의 기법은 센서 노드의 밀도에 영향을 받지 않기 때문에 센서 노드의 밀도가 성능평가에 영향을 주지 않는다. 반면 제안하는 기법은 센서 노드의 밀도에 의존하는 APIT 알고리즘을 사용하기 때문에 센서 노드의 수가 적을 때보다 많을 때 오차 값이 더 작아지는 것을 확인할 수 있다. 그림 8과 그림 9의 그래프의 변화를 보면 제안된 방법의 경우 200개 이하의 센서 노드가 사용된 환경에서는 센서 노드의 밀도가 증가함에 따라 오차거리가 감소하지만 200개 이상의 센서 노드가 존재하는 경우에는 센서 노드 밀도의 변화가 큰 영향을 주지 못하는 것을 확인할 수 있다. 이는 센서 노드 수가 200개 이상이 되는 경우, APIT 알고리즘의 신뢰성이 충분히 높다는 것을 반영하는 결과이다.

그림10은 영역이 3개 일 때 센서 노드의 개수가 50개 및 400개 인 경우 각각에 대하여 오차거리의 분포를 나타낸 것이다. x축은 오차거리를 구간별로 나누어서 나타내었고 y축은 센서노드의 수와 누적 분포함수(CDF)를 나타내었다. 센서노드의 수가 50개인 경우 (그림 10a), 제안된 기법이 50개의 센서 노드 중 33개의 센서 노드가 2m 이내의 오차를 보



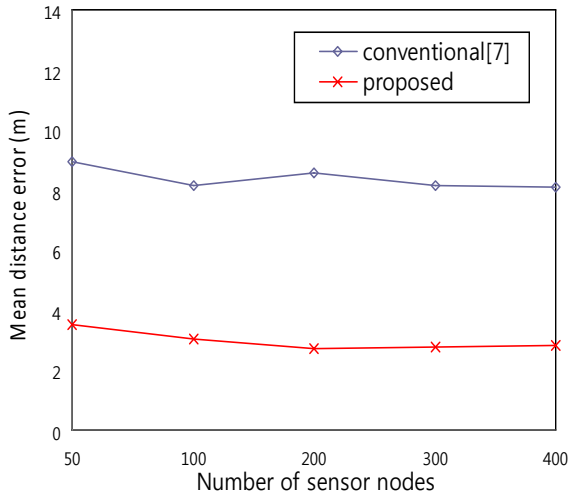


그림 8. 영역 3개일 때 노드 수에 따른 평균 오차  
Fig. 8. Mean distance error according to the number of nodes with three areas

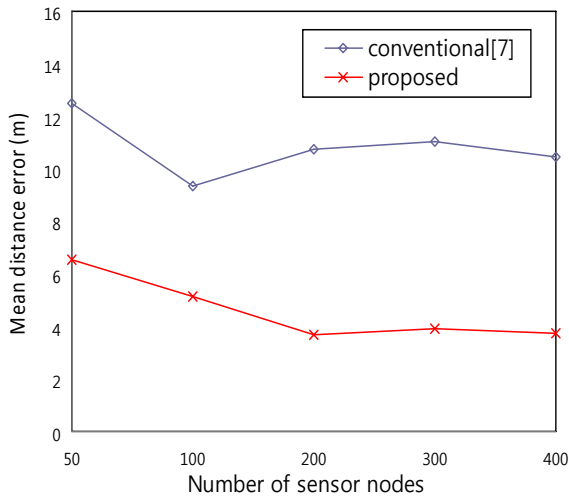


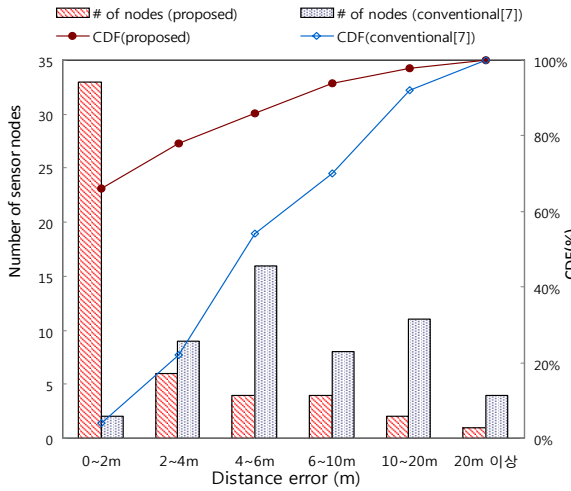
그림 9. 영역 4개일 때 노드 수에 따른 평균 오차  
Fig. 9. Mean distance error according to the number of nodes with four areas

인 반면, 기존의 기법에서는 50개의 센서 노드 중 2개의 센서 노드만이 2m이내의 오차를 보였다. 구간을 늘려서 4m이내의 오차를 보인 경우는 기존의 기법이 22% 정도인데 반해 제안된 기법은 78% 정도로, 대다수의 센서 노드에 대해 우수한 오차거리 성능을 보임을 알 수 있다. 그림 10b의 경우는 그림 10a와 동일한 실험환경에서 센서노드의 수를 400개로 증가시켜 실험한 결과이다. 센서 노드 50개를 이용할 때의 평균 오차거리가 3.5m였던 것에 비해, 센서 노드 400개를 이용할 때의 평균 오차거리는 2.8m로 감소하는 것을 확인할 수 있다. 또한, 50개의 센서 노드를 이용한 앞의 실험에서와 유사하게, 400개의 센서 노드 중에 268개의 센서 노드

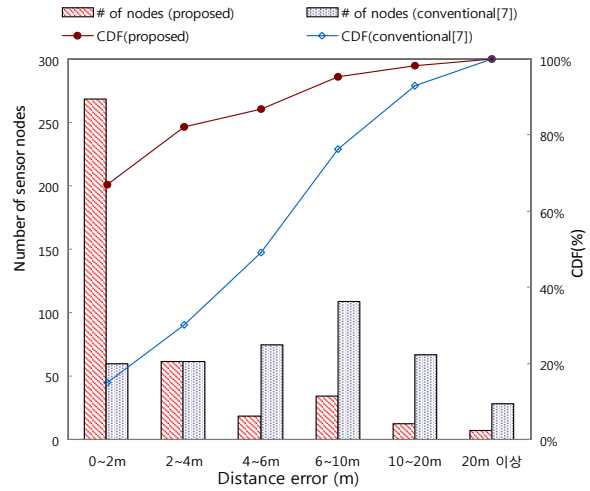
(약 67%)가 2m이내의 오차를 보였다. 구간을 늘려서 4m이내의 오차거리를 갖는 센서 노드의 비율을 살펴보면, 약 82%로서, 이는 기존 기법에서 약 30%의 노드들만이 해당 오차거리 이내의 성능을 만족시키는 것에 비해 두 배 이상 성능이 향상될 수 있음을 보인다. 이는 또한 그림 10a의 50개 노드를 이용하여 제안된 기법을 수행한 경우에 비해 4% 정도의 성능 향상이 있음을 보인다. 이는 노드 밀도의 증가에 의해 APIT 알고리즘의 신뢰성이 향상됨으로서 증가된 수치라 할 수 있다.

그림 11은 그림 10의 실험환경에서 영역수를 3개에서 4개로 늘려서 얻은 실험 결과이다. 그림 11a의 경우 센서노드의 수는 50개일 때의 실험 결과를 나타내었다. 실험결과 제안된 기법이 50개의 센서 노드 중 22개 (약 44%)의 센서 노드가 2m 이내의 오차를 보였다. 이러한 수치는 영역 3개일 때의 실험결과인 66%에 비해 조금 감소한 것으로, 영역 4개인 실험 환경이 영역 3개인 실험 환경보다 다양한 무선 채널 환경 변화를 유발하고 그에 따른 오차 거리가 향상될 수 있음을 의미한다. 그러나 여전히 기존의 기법에 비해 우수한 오차거리 성능을 보장하는 것을 확인할 수 있다. 4m이내의 오차를 보인 경우는 제안된 기법이 50%의 비율을 보인데 반해 기존의 방법은 12%만이 4m 이내의 값을 얻었다. 그림 11b의 경우는 그림 11a와 동일한 실험 환경에서 센서노드의 수를 400개로 증가 하여 얻은 실험 결과이다. 400개의 센서 노드 중에 218개의 센서노드가 2m이내의 오차를 발생하였고 누적 분포로 보면 4m 이내의 경우 68.8%, 6m이내의 경우 79%로 기존의 기법이 각각 22%, 30.8%을 나타내는 것에 비해, 두 배 이상 성능이 향상 되었음을 알 수 있다.

그림 12는 제안된 기법의 주된 특징인 재귀적인 PLE추정이 성능평가에 어떤 영향을 주는지 보여준다. 모의실험에서는  $\epsilon=2m$  를 적용하였다. 즉, 제안된 기법은 반복적인 PLE 추정과 위치추정을 통해서 추정된 마지막 위치와 이전 시행에서의 추정된 위치 사이의 거리가 2m이내 일 때까지 반복하게 된다. 그에 따른 결과 그림 12에서 보는 것과 같이 재귀적인 PLE추정 방법이 적용되는 경우, 그렇지 않은 경우에 비해 센서 노드의 밀도와 무관하게 성능이 향상됨을 알 수 있다. 또한, 그림 12에서는  $\epsilon=1m$ 인 경우에 대한 실험 결과도 동시에 보이고 있다. 제시된 결과는  $\epsilon$  값을 더 작게 설정한다면 정확도



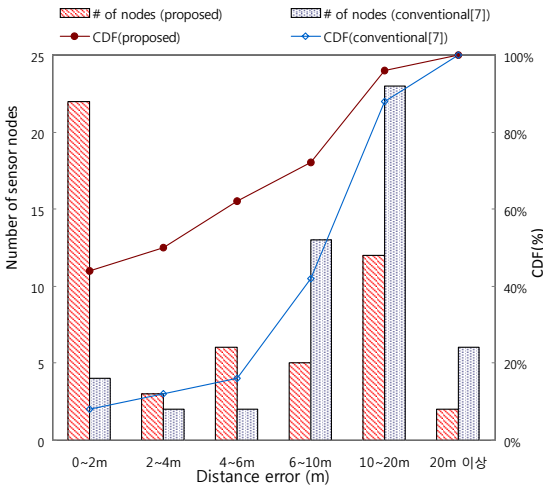
(a) Case of using 50 nodes



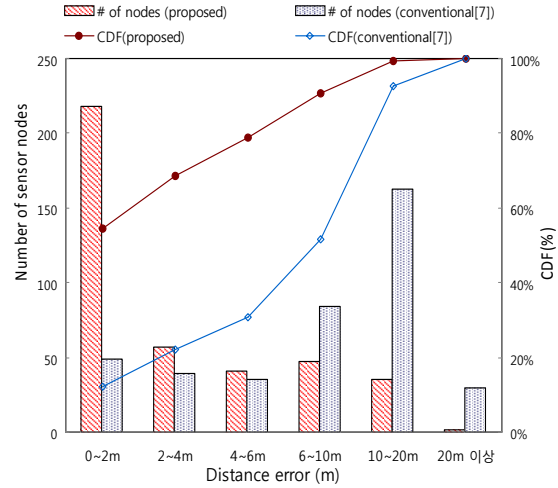
(b) Case of using 400 nodes

그림 10. 영역 3개 일 때 센서 노드 밀도에 따른 히스토그램.

Fig. 10. Histogram showing the distance error with three areas according to nodes density



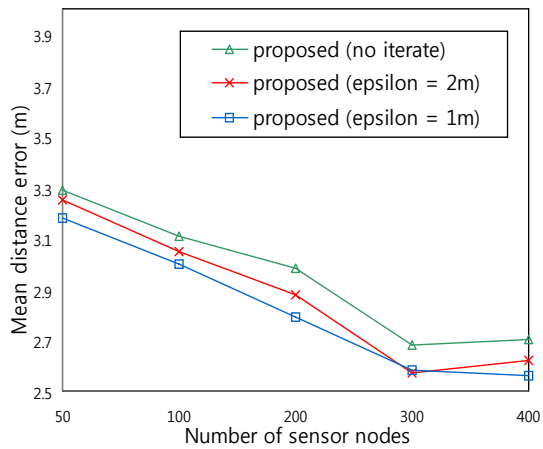
(a) Case of using 50 nodes



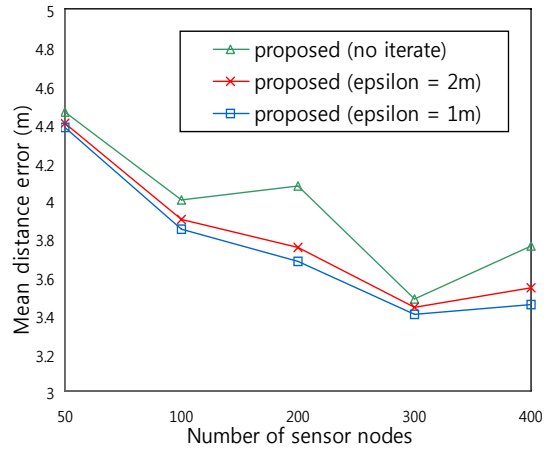
(b) Case of using 400 nodes

그림 11. 영역 4개 일 때 센서 노드 밀도에 따른 히스토그램.

Fig. 11. Histogram showing the distance error with four areas according to nodes density



(a) Case of using three areas



(b) Case of using three areas

그림 12. PLE를 반복 추정된 경우와 적용 하지 않은 경우 비교

Fig. 12. PLE estimation with iteration vs. PLE estimation without iteration

를 향상 시킬 수 있음을 보인다.

### V. 결 론

본 논문에서는 반복적 경로 감쇄 지수의 추정과 위치 추정을 통해 센서 노드의 위치 추정 정확도를 증가시키는 기법을 제안하였다. 기존의 RSS 기반 위치 추정 알고리즘들은 센서 노드가 인접한 앵커 노드 혹은 자신의 위치를 알고 있는 특정 노드에 의해 계산된 경로 감쇄 지수를 자신의 위치 추정에 그대로 적용하는 기법을 이용하고 있다. 이에 비해, 제안된 방법은 센서 노드가 스스로 각 앵커로부터의 경로 감쇄 지수를 반복적으로 추정하여, 이를 위치 추정에 이용하도록 하는 방법을 사용하였다. 제안된 기법은 APIT 알고리즘을 이용하여 임의의 센서 노드 주변에 분포한 최적의 세 앵커 노드들을 도출하는 과정을 포함하고 있으며, 그에 따라 APIT 알고리즘의 정확도가 위치 추정의 정확도에 일부 영향을 미칠 수 있다는 것을 모의 실험을 통해 보였다. 모의 실험 결과는 기존의 방법에 비해 제안된 기법의 위치 추정 정확도가 전반적으로 증가하는 것을 보였다.

### References

[1] B. H. Wellenhoff, H. Lichtenegger and J. Collins, *Global Positioning System: Theory and Practice.*, Springer Verlag, 1997.

[2] A. Savvides, C. Han and M. B. Srivastava, "Dynamic fine-grained localization in ad-hoc networks of sensors," in *Proc. ACM Int. Conf. Mob. Comput. Netw. 2001 (MobiCom 2001)*, pp. 166-179, Rome Italy, July 2001.

[3] D. Niculescu and B. Nath, "Ad hoc positioning system (APS) using AOA," in *Proc. IEEE Int. Conf. Comput. Commun. 2003 (INFOCOM 2003)*, pp. 1734-1743, San Francisco USA, April 2003.

[4] T. He et al., "Range free localization schemes for large scale sensor networks," in *Proc. ACM Int. Conf. Mob. Comput. Netw. 2003 (MobiCom 2003)*, pp. 81-95, San Diego USA, Sep 2003.

[5] D. Niculescu and B. Nath, "DV based

positioning in ad hoc networks," *Telecommun. Syst. (TS)*, vol. 22, no. 1-4, pp. 267-280, 2003.

[6] H. J. Kim and S. J. Yoo, "Group based DV-Hop localization algorithm in wireless sensor network," *J. Kor. Info. Comm. Soc. (J-KICS)*, vol. 34, no. 1, pp. 65-75, Jan 2009.

[7] S. Y. Park, H. S. Ahn, and W. Yu, "Adaptive path-loss model-based indoor localization," in *Proc. Int. Conf. Consum. Electron. 2008 (ICCE 2008)*, pp. 1-2, Las Vegas USA, Jan 2008.

[8] Y. S. Lu, C. F. Lai, C. C. Hu, Y. M. Huang, and X. H. Ge, "Path loss exponent estimation for indoor wireless sensor positioning," *KSII Trans. Internet Inf. Syst. (TIIS)*, Vol. 4, No. 3, pp. 243-257, June 2010.

[9] H. Karl and A. Willig, *Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks.*, Wiley, 2007.

[10] J. N. Portela and M. S. Alencar, "Cellular coverage map as a voronoi diagram," *J. Commun. Inf. Syst. (JCIS)*, Vol. 23, No. 1, pp. 22-31, 2008.

최 준 호 (Jun-Ho Choi)



2012년 2월 인하대학교 정보통신공학과(공학사)  
2012년 3월~현재 인하대학교 정보통신공학부 석사과정  
<관심분야> Sensor Network, Cognitive Radio,

최 재 각 (Jae-Kark Choi)



2006년 2월 인하대학교 전자공학과(공학사)  
2008년 8월 인하대학교 정보통신대학원(공학석사)  
2008년 9월~현재 인하대학교 정보통신대학원 박사과정  
<관심분야> Cognitive Radio, Seamless handover, MAC

유 상 조 (Sang-Jo Yoo)



1988년 2월 한양대학교 전자통신학과(공학사)

1990년 2월 한국과학기술원 전기및전자공학과(공학석사)

2000년 8월 한국과학기술원 전자전산학과(공학박사)

1990년 3월~2001년 2월 KT 연구 개발본부

2001년 3월~현재 인하대학교 정보통신공학부 교수  
<관심분야> 무선 네트워킹 프로토콜, Cross-layer 프로토콜 설계, Cognitive Radio Network, 무선센서네트워크, 미래인터넷