

IEEE 802.15.4 네트워크 기반의 실내 위치측정 시스템 구현 및 실험적 분석

준회원 김 태 운*, 최 우 열*, 정회원 임 혁*

Implementation and Empirical Evaluation of Indoor Localization in IEEE 802.15.4 Network

Taewoon Kim*, Wooyeol Choi* Associate Members, Hyuk Lim* Regular Member

요 약

현재, 위치/공간 정보는 다양한 맥락으로 해석 및 적용되어 군사, 교통, 공공안전 등 여러 분야에 광범위하게 사용되고 있으며, 이와 함께 위치측정 기술의 정확도 향상을 위한 기술적 연구도 활발히 진행 중이다. 그 중, 상대적으로 제약조건이 많은 실내 위치측정의 경우 RSS (Received Signal Strength) 기반의 위치측정 기술이 주로 사용된다. 본 논문은 IEEE 802.15.4 네트워크에서 RSS 기반의 실내 위치측정기술의 정확도 향상에 대한 이론적, 실험적 연구를 수행하였다. 이를 위해 CC2430 칩을 이용하여 자체 제작한 노드와 CC2420 기반의 MICAz 노드로 실내 테스트베드를 구성하였고, 또한 위치측정 시스템 및 모니터링 시스템을 구현하여 실험에 사용하였다. 실험에 사용된 위치측정 시스템의 이론적 분석 뿐 아니라, 다양한 조건하에 수행된 실험결과를 바탕으로 실험결과에 영향을 미치는 요소들에 대한 다각적인 분석을 수행하였다. 이를 통하여, 제한된 환경에서 최적의 위치측정 시스템을 구성하기 위한 해결책을 제시한다.

Key Words : localization; IEEE 802.15.4; RSS (received signal strength)

ABSTRACT

Currently, geographical information is interpreted and adopted in a wide range of context, and used for meeting diverse demands, such as, battlefield, traffic management, or public safety. With such an explosive increase of location-based applications, a considerable amount of research on the localization technique has been carried out. Among them, RSS (Received Signal Strength)-based approach is used especially for the indoor localization due to intrinsic limitations of the indoor environment. In this paper, we perform theoretical and empirical studies on enhancing the accuracy of the RSS-based localization on the IEEE 802.15.4 network. To this end, we set up an indoor testbed and implement a localization system on it. In addition to the theoretical analysis of the localization algorithm that we used, an empirical analysis on the effect of the factors which affect the accuracy of a localization system is carried out. Finally, we suggest some critical guidelines that should be considered for building a highly accurate localization system.

I. 서 론

최근 무선 통신 및 네트워킹 기술의 발전과 더불어

※ 본 연구는 한국과학기술원 국방무인화기술 특화연구센터를 통한 국방과학연구소 연구비 및 한국교육과학기술부와 한국연구재단이 출연한 해외연구기관유치사업 연구비 지원으로 수행되었습니다.

* 광주과학기술원 정보통신공학과 무선통신 및 네트워킹 연구실 (hlim@gist.ac.kr)

논문번호: KICS2009-10-485, 접수일자: 2009년 10월 27일, 최종논문접수일자: 2009년 12월 28일

어 무선 센서 기술의 향상에 따라 ‘언제 어디서나 사용 가능하다’는 개념의 유비쿼터스 (ubiquitous) 컴퓨팅이 우리의 실생활에 한층 더 가까워지고 있다. 이러한 유비쿼터스 컴퓨팅의 주요 요소기술 중의 하나가 바로 위치추정 (localization) 기술이다. 특히, 무선 센서 네트워크 (Wireless Sensor Networks, WSNs) 에서 위치추정 기술은 비중은 상당한 비중을 차지하는데, 이것은 무선 네트워크 상의 여러 자원들이 공간적으로 어떻게 이용 및 관리되고 있는지를 인지하는 것은 제한된 자원의 관리 및 할당에 있어서 필수적인 요소이기 때문이다. 다시 말해, 무선 네트워크상에 존재하는 자원들의 위치 정보는 효율적인 자원 관리와 제어를 가능하게 한다.

무선 네트워크에서의 위치 인식 기술에는 흔히 알려진 Global Positioning System (GPS)와 같이 실외에서 물체의 위치를 인식하는데 사용되는 기술과, 실내에서 위치를 측정하는 기술이 있다. 기존의 위치 인식 기술은 실외 환경 중심으로 많이 연구되었으나, 최근에 실내 유비쿼터스 환경 구축에 대한 요구가 증가하면서 실내 위치 인식 기술의 연구가 활발히 진행되고 있다. 하지만 무선 센서를 이용한 실내 위치 인식 기술의 경우, 여러 문제점이 존재한다. 이것은 기존의 실외 위치 인식 기술들이 실내 환경에 적합하지 못하고, 실내 환경에서는 RF (Radio Frequency) 신호의 다중경로 페이딩 (multi-path fading) 뿐 아니라, 온도, 습도, 사람들의 움직임, 실내 장애물의 배치 등 고려해야 할 많은 변수가 존재하기 때문이다. 이러한 실내 환경에서 나타나는 무선 신호의 특성에 관한 연구를 살펴보면, 위치추정에 주로 사용되는 Received Signal Strength (RSS)를 측정한 결과 상당한 변동이 있음을 밝혔다^[1]. 위치 추정에 가장 주요한 역할을 하는 RSS값이 일정하지 않고 변동이 심하다는 것은 실내 위치 인식 시스템이 실내 환경에서 발생할 수 있는 다양한 변화에 적응적으로 대응해야 하며, 발생하는 측정 오차의 영향을 줄일 수 있는 방안을 가지고 있어야 한다는 것을 의미한다.

현재, 정확도 높은 실내 위치 인식을 위한 RSS 기반의 위치추정 기술에 대한 연구가 다각적인 측면에서 진행되어 오고 있다. 이러한 연구에서 중요한 이슈 중에 하나로, 측정된 RSS값과 실제 지리적인 거리와의 관계에 대하여 이론적 근거를 통해 제안하고, 시뮬레이션 또는 실험을 통하여 이를 증명하는 연구가 있다. 최근 H. Lim et al.^[1]은 IEEE 802.11 WLAN 환경에서 주변 환경에 적응적으로

동작하는, 이로 인해 별도의 초기화 과정이 필요없는 ‘자가설정 위치추정 시스템’을 제안하였다. 그림 1은 해당 위치추정 시스템의 동작 방식을 나타내고 있다. 이 시스템은 비콘노드간의 거리정보와 수신 신호 세기 정보를 이용하여 신호-거리 맵 (Signal-Distance Map, SDM)을 구성한다. 이렇게 형성된 SDM을 이용하여 위치를 추적하고자 하는 노드의 위치를 예측한다. 이 시스템 또한 모바일노드 (위치 를 알고자 하는 노드)와 비콘노드 (모바일노드의 위치를 측정하기 위한 고정노드)간에 실시간으로 측정되는 RSS 값을 이용하여 위치추정을 하는데, 이 과정에서 순간순간 변화하는 상황에 적응적으로 대처하여 높은 수준의 위치추정 결과를 얻을 수 있다.

위치추정 알고리즘 외에도 위치추정 시스템을 구성하고 정확도에 영향을 미치는 다양한 요소가 존재한다. 예를 들면, 센서노드가 전송하는 무선 신호의 세기, 센서 노드들의 지리적 배치, 장애물의 존재 유무, 위치추정에 사용된 시간 등이 그것인데, 제한된 환경에서 주어진 자원을 어떻게 활용하느냐에 따라 위치추정 시스템의 정확도는 확연히 달라진다.

본 논문은 다음과 같은 점에서 차별화 되며 중요성을 가진다. 첫째, 직접 제작한 소형의 센서 노드를 이용하여 IEEE 802.15.4 네트워크에서의 실내 위치추정 시스템을 위한 테스트베드를 제작하였으며, 또한 위치추정 알고리즘을 구현하여 실험에 활용하였다. 실험에 사용된 장비는 Texas Instrument (TI)^[22]사의 CC2430 기반의 자체제작 노드와 CrossBow^[24]사의 CC2420 기반의 MICAz 노드이다. 각각은 2.4 GHz 대역의 RF 통신이 가능하며, IEEE 802.15.4를 지원한다. 둘째, 위치추정에 영향을 미치는 환경 및 각종 설정에 대한 다각적인 실험 및 분석을 통하여 제안된 환경에서 더 높은 위치추정 정확도를 가지는 시스템을 구성하는 방법에

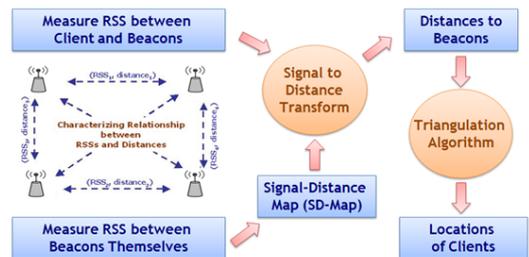


그림 1. H. Lim et al. 이 제안한 WLAN에 기반한 위치추정 시스템의 동작방식.

대한 분석을 수행하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 현재 까지 개발된 위치 인식 기술에 대해 살펴보고, III 장에서는 위치추적 실험에 사용된 자가설정 위치측 정 시스템에 대한 이론적 분석을 수행 한다. IV장 에서는 실내 테스트 베드 구성에 대하여 알아본다. 테스트베드를 통한 실내 무선 환경의 특성에 대하 여 실험적인 분석을 V장에서 수행하고, VI장에서는 다양한 조건에서의 위치측정 실험 및 이를 기반으로 하는 분석을 수행한다. 마지막으로, 결론과 향후 연구계획에 대해 VII장에서 설명한다.

II. 관련 연구

이 장에서는 기존의 위치측정 기술에 대하여 살 펴본다. 위치측정 기술은 크게 실외 위치측정 기술 과 실내 위치측정 기술로 나눌 수 있으며, 각각은 상이한 특징을 가진다.

2.1 실외 위치측정 기술

실외 환경에서 사용되는 대표적인 위치측정 기술 에는 GPS (Global Positioning System)가 있다. GPS는 약 30개의 위성을 이용하여 전 세계를 대상 으로 서비스하는 지리 정보 시스템이며, 대략 수 미 터 이내의 오차를 가진다. 현재 지리정보, 항해, 시 간동기화 등의 목적으로 사용되고 있다. 하지만, GPS 시스템의 경우 위성 전파의 특성 상 실내 위 치측정에는 적합하지 못하다.

2.2 실내 위치측정 기술

실내 환경의 경우 많은 제약이 존재하며 오차를 유발하는 다양한 주변 환경적 요인으로 인해 이를 극복하기 위한 여러 방법들이 연구되고 있다. 실내 위치측정에 사용되는 신호는 그 종류에 따라 적외 선, 초음파, UWB (Ultra-wideband), RF 신호가 있 으며, 신호 측정방식에 따라 AOA (Angle Of Arrival), TOA (Time Of Arrival), TDOA (Time Difference Of Arrival), RSS (Received Signal Strength)로 분류된다. 또한, 위치를 계산하는 방법 으로는 삼각측량과 Scene Profiling 등이 있다.

적외선의 범위를 이용한 실내 위치 인식 기술로 는 Active Badge^[2]가 있으며, Active Bat^[3]과 MIT 의 Cricket^{[4], [5]}은 초음파의 전파 속도를 이용하여 위 치를 측정한다. Ubisense^[6]의 경우 UWB를 이용하 여 위치를 측정하는 방식으로, 상당히 정확한 위치

를 측정하지만 고가인 단점이 있다.

AOA^[7], TOA^[8], TDOA^{[4], [9]}를 이용한 실내 위치 인식 시스템은 1미터 이내의 높은 정확도를 보여주고 있다. 그러나 이러한 방식을 이용하기 위해서는 추가적인 하드웨어가 필요하게 된다. AOA의 경우 빔 포밍 (beam forming)을 위한 지향성 안테나가 필요하며, TOA와 TDOA의 경우 매우 정확한 수준의 타이머가 요구된다.

RSS를 기반으로 하는 실내 위치 인식 기술의 경 우, 많은 무선 장비들이 쉽게 RSS를 이용할 수 있 어 많은 연구가 진행되고 있는 추세이다. RSS를 이 용하는 방법에 따라 다시 구분할 수 있는데, 거리기 반 방식의 경우 측정된 RSS값을 이용하여 AP와 클라이언트의 거리를 예측하고, 이 거리를 바탕으로 삼각측량법에 의해 클라이언트의 위치를 측정한다^{[10]-[12]}. 이 외에도, Scene Profiling방식의 알고리즘 과 이를 비롯한 다양한 실내 위치 인식 기술들이 있다^{[13]-[18]}.

이와 같이 가용성이 높은 RSS를 기반으로 하는 기술이 많이 연구되고 있지만, 변동이 심한 RSS의 특성상 잦은 변동에 의한 영향을 최소화 하고 다양 한 실내 환경에 적합한 알고리즘의 연구가 필요하 다. Gwon과 Jain^[9]이 제안한 PSS (Proximity in Signal Space)라고 불리는 방식의 경우, 임의의 AP 는 다른 모든 AP와의 RSS를 수집하고 다중 선형 함수 (multiple linear function)를 생성한다. 이 다 중 선형함수는 자신과 다른 AP간의 RSS와 실제 지리적 거리의 관계 정보를 말한다. 클라이언트는 가장 인접한 AP의 다중 선형함수를 이용하여, 해당 AP를 제외한 나머지 AP들과의 거리를 계산한다. 그리고, 두 번째로 인접한 AP의 다중 선형함수를 통해 나머지 AP와의 거리를 계산한다. 이러한 방식 과 더불어 TIX (Triangular Interpolation and eXtrapolation)을 제안하여 위치 인식의 정확도를 향 상시키고 있다.

III. 자가설정 위치측정 시스템^[1]

자가설정 위치측정 시스템은 위치측정 문제를 다 음과 같이 정형화 한다. 네트워크에는 비콘노드 (Beacon node)와 모바일노드 (Mobile node), 두 종 류의 노드가 존재하며 이 중 비콘노드는 일종의 참 조노드 (Reference node)로써 위치가 미리 알려져 있으며 이동성을 가지지 않는, 위치추적 시 기준점 을 제공하는 노드이다. 모바일노드는 이동성을 가지

며 (혹은 이동성을 가지지 않을 수도 있다) 위치추적을 하려는 대상에 해당하는 노드이다. 비콘노드의 인덱스를 $\{1, \dots, m\}$ 으로, 모바일노드의 인덱스를 $\{n\}$ 으로 정의하자. 임의의 노드 i 의 위치를 x_i 로, 노드 i 가 측정하는 노드 j 의 RSS를 s_{ij} 라 할 때, 위치추적 문제는 다음으로 정형화 하여 표현할 수 있다.

$i, j \in \{1, \dots, m\}$ 이고 x_i, s_{ij}, s_{ni} 가 주어졌을 때, 임의의 모바일노드 n 에 대하여 x_n 을 구하라.

주어진 데이터 중 x_i, s_{ij} 를 이용하여 Signal-Distance Map (SDM)을 구성할 수 있다. SDM은 신호세기과 거리를 이용한 일종의 관계함수로서, 신호세기과 거리의 관계를 나타내주는 기능을 한다. 정의 내린 바와 같이 s_{ij} 를 노드 i 가 측정하는 노드 j 의 신호세기라 할 때, 비콘노드 i 가 측정하는 모든 비콘노드의 신호세기 벡터를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{비콘노드 상호간 신호세기 } s_i = [s_{i1}, \dots, s_{im}]^T$$

이제 모든 비콘노드에 대하여 상호간 신호세기 벡터를 연결하면 $m \times m$ 의 RSS 행렬 S 를 얻을 수 있다.

모든 비콘노드에 대한 상호간 RSS 행렬 $S = [s_1, \dots, s_m]$.

같은 방법으로 비콘노드간 거리에 해당하는 행렬을 만들 수 있다. 노드- i 에서 측정하는 노드- j 까지의 거리를 d_{ij} 라 할 때, 임의의 비콘노드 i 에서 전체 비콘노드에 대한 거리벡터를 $d_i = [d_{i1}, \dots, d_{im}]^T$ 로 나타낼 수 있고 이를 전체 비콘노드로 확장하면 $m \times m$ 의 비콘노드간 거리 행렬 D 를 얻을 수 있다.

$$D = [d_1, \dots, d_m]^T$$

Friis 자유공간 모델이나 2-ray ground 모델이 가정하는 바와 같이 거리와 측정된 RSS값 사이에는 지수 단위의 선형성이 있다는 가정 하에 선형 변환 (linear transformation) 행렬 T 를 정의할 수 있다.

$$T = \log(D)S^T(S \times S^T)^{-1}.$$

이제 위치를 측정하고자 하는 임의의 모바일노드 n 이 이웃하는 비콘노드간 측정하는 RSS 벡터(s_n)를 이용하여 모바일노드와 이웃하는 비콘노드간의 거리 (d_n)를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$d_n = T \times s_n.$$

모바일노드로부터 이웃하는 비콘노드간 거리와 반복 (iteration) 알고리즘을 이용하여 모바일노드의 위치를 예측할 수 있다. 자가설정 위치추정 시스템은 아래의 목적함수 (object function)를 최소화 하는 간단한 descent gradient method를 사용한다.

$$\varepsilon = \frac{1}{2} \sum_1^m (f_d(\tilde{x}, x_i) - \tilde{d}_i)^2.$$

이 때, $f_d(a, b)$ 는 두 위치 a 와 b 사이의 유클리디안 거리 (Euclidean distance)를 의미하며, \tilde{x} 는 예측한 모바일노드의 위치를, \tilde{d}_i 는 i 번째 비콘노드까지의 예측한 거리를 의미한다. 이는 SDM을 이용한 연산을 수행하여 얻을 수 있다.

이제 위의 목적함수를 미분하여 \tilde{x} 를 업데이트 하는 다음의 반복 식 (iteration equation)을 얻을 수 있다.

$$\tilde{x}[k+1] = \tilde{x}[k] + \alpha \sum_{i=1}^m \left(1 - \frac{\tilde{d}_i}{f_d(\tilde{x}, x_i)} \right) (\tilde{x}[k] - x_i)$$

이 때, α 상수의 단위 값으로 자가설정 위치추정 시스템에서는 0.1을 사용 하였고 (이 값은 본 실험에서 사용한 테스트베드 상에서 반복적인 실험을 통해 찾아낸 최적의 값이다), 초기의 예측 값인 $\tilde{x}[0]$ 는 예측한 거리 값이 최소인 비콘노드의 위치로 설정하도록 하였다.

이러한 특징의 자가설정 위치추정 시스템이 가지는 장점으로는 1) 별도의 초기화 과정 (on-site survey 또는 initial training 과정)이 필요 없으며, 2) 무선 신호의 다중페이딩현상 뿐 아니라 실내 상황의 변화 (예를 들어, 문의 개폐 여부, 사람의 이동, 가구의 재배치, 등)에 적응적으로 동작한다는 점이 있다.

IV. 시스템 구성

본 절은 실험을 위하여 구성한 실내 테스트베드 및 그 구성에 대한 자세한 설명을 제공한다. 이는 전체적인 시스템의 구조, 각 노드의 명세 (specification), 위치추적을 위하여 구현한 프로그램에 대한 자세한 설명, 및 테스트베드 환경에 대한 설명을 포함한다.

4.1 전체 시스템의 구성

본 논문에서 실시한 모든 실험은 공통의 시스템 구성 하에 수행되었다. 시스템은 3개 이상의 비콘노드 (Beacon node: 고정되어 있으며 사전에 위치가 알려진 노드), 1개 이상의 모바일노드 (Mobile node: 위치 추적을 하고자 하는 노드), 1개의 코디네이터노드 (Coordinator node: 각 노드가 전송하는 데이터를 수집하여 중앙의 서버 컴퓨터로 전송하는 역할을 담당하는 노드), 그리고 1대의 서버 컴퓨터 (수집된 데이터를 기반으로 위치추적을 수행하며, 그 결과를 보여주는 컴퓨터) 로 구성된다. 그림 2 는 전체 시스템의 구성과 기본적인 동작방식에 대한 개념도이다.

자가설정 위치추정 시스템의 동작방식은 다음과 같다. 서버컴퓨터는 네트워크에 배치된 비콘노드의 위치정보를 알고 있다고 가정하며 비콘노드는 이동성을 가지지 않는다. 시스템의 시작과 동시에 비콘노드는 주기적으로 광고 메시지를 전송한다. 이웃 비콘노드의 광고 메시지를 들은 비콘노드는 RSS (Received Signal Strength) 값을 계산하여 코디네이터노드로 전송한다. 이 때, 코디네이터노드는 전송 받은 데이터를 서버컴퓨터로 전송하는 역할을 한다. 비콘노드 사이에서 측정된 RSS값을 수신한 서버컴퓨터는 비콘노드의 위치정보 (사전에 주어진다) 가

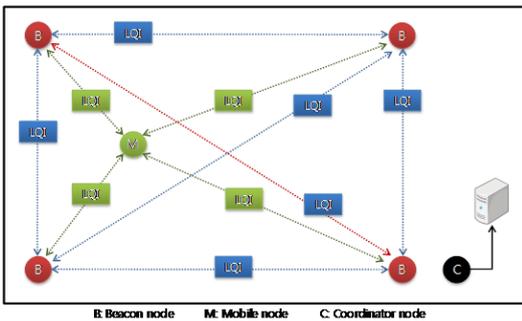


그림 2. 자가설정 위치추정 시스템의 전체적인 구성과 동작 방식에 대한 개념도

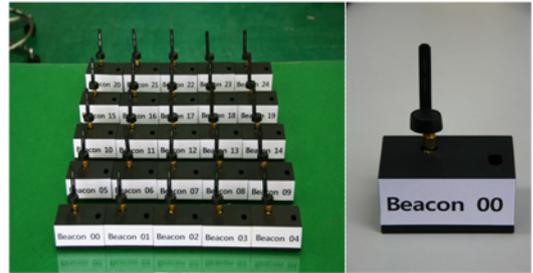


그림 3. 실험에 사용한 비콘노드

정)와, 수신한 RSS값을 이용하여 Signal-Distance Map (SDM)을 구성한다. SDM은 거리와 RSS값을 이용하여 만든 일종의 함수로써, RSS값을 이용하여 해당하는 거리정보를 얻는데 사용한다. 이후 위치추적을 하고자 하는 모바일노드가 광고메시지를 전송하면 비콘노드는 이 메시지를 듣고 RSS값을 계산하여 코디네이터노드로 전송한다. 서버컴퓨터는 미리 만들어놓은 SDM을 이용하여 모바일노드의 위치를 예측한다.

4.2 노드 명세

테스트베드 구축에 사용된 비콘노드와 모바일노드는 서로 다른 종류의 노드이다. 각 비콘노드는 TI^[22]사의 CC2430 칩과 안테나 모듈을 이용하여 자체 제작하였다. CC2430 칩은 8051 마이크로 컨트롤러 기반의 802.15.4 air-interface를 지원하는 모듈로써 자세한 사항은 TI사의 CC2430 Data sheet^[23]을 참고하길 바란다. 반면에, 모바일노드는 CrossBow Technology^[24] 사의 MICAz 노드를 사용하였다. MICAz 노드의 경우 CC2420 칩 기반으로 동작하며, 역시 802.15.4 air-interface를 지원한다. 기본적으로 CC2430 기반의 비콘노드와 CC2420 기반의 모바일노드는 동작하는 주파수가 다르며 또한 전송하는 패킷의 포맷이 다르다. 따라서 서로의 신호를 감지하지 못할 뿐 더러 감지한다고 하더라도 정상적으로 해독할 수 없다. 이를 해결하기 위하여 CC2430 기반의 비콘노드의 MAC/PHY 계층에서 다음과 같이 두 부분을 수정하였다. 첫째, 서로의 신호를 감지할 수 있도록 동작 주파수를 변경하였다. 둘째, 감지한 신호로부터 데이터를 추출할 수 있도록, 즉 MICAz 가 사용하는 패킷의 프레임을 비콘노드가 해석할 수 있도록 수정하였다. 이를 통하여 이기종의 노드가 상호 통신을 할 수 있는 시스템을 구축하였다.

4.3 위치측정 시스템 및 응용 프로그램

서버컴퓨터가 담당하는 역할은 두 가지이다. 첫째는 위치측정 알고리즘 부분으로, 코디네이터 노드가 수집한 데이터를 이용하여 위치측정을 수행하는 부분이다. 다음으로 둘째는, 응용 프로그램 부분으로, 측정된 결과를 이용하여 사용자가 이해하기 쉬운 형태로 모바일 노드의 위치를 표시하여 주는 부분이다.

위치측정 알고리즘은 III장에서 설명한 자가설정 위치측정 알고리즘을 구현하였고, 응용 프로그램은 그림 4와 같은 인터페이스 구조를 가지도록 설계하였다. 응용 프로그램은 크게 3부분으로 구성되어 있다. 첫째로, 화면 왼쪽은 실시간으로 추적하고자 하는 노드의 위치를 확인할 수 있는 부분이다. 일정한 주기로 모바일 노드의 위치는 갱신되며 이는 바로 화면상에 반영이 된다. 둘째, 화면 우측 상단에는 임의의 비콘노드와 모바일노드간 신호변화를 관찰할 수 있는 부분이 있다. 이를 통하여 실시간으로 임의의 두 노드간 신호의 세기 변화를 관찰할 수 있다. 마지막 셋째는 화면 우측 하단의 노드 설정 부분이다. 이를 통해 임의의 비콘노드를 위치측정에 사용하지 않도록 하거나 반대로 사용하도록 지정할 수 있다.

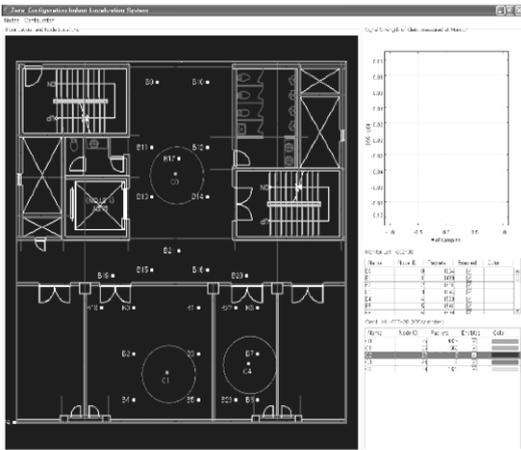


그림 4. 위치추적에 사용한 응용프로그램의 화면구성.

4.4 테스트베드 배치도

본 실험을 위하여 학과건물 4층에 테스트베드를 구축하였다. 4층에 시험적으로 비콘노드를 배치한 예를 그림 5에서 볼 수 있다. 화면에 표시된 흰 색의 점은 비콘노드의 위치로 사용될 곳을 나타낸다.

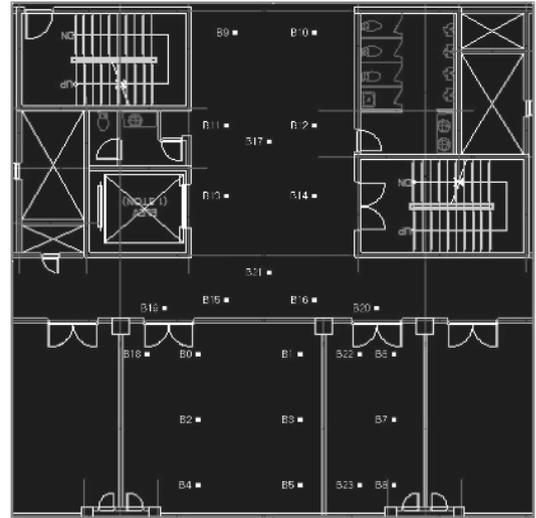


그림 5. 시험적으로 4층에 비콘노드를 배치한 예.

V. 실내 무선환경 특성 분석

본 절에서는 테스트베드를 이용하여 실내 위치추적에 사용되는 RSS값의 변화를 관찰하고, 이를 통해 실내 무선 환경의 특성을 분석해 보았다.

무선센서네트워크를 활용한 무선링크 측정에 주로 사용되는 두 척도로는 Received Signal Strength (RSS)와 LQI (Link Quality Indicator) 가 있다.

RSS는 수신한 신호의 세기를 측정할 값이며, 8 symbol periods (128 us)에 걸쳐 계산한 평균 값을 사용한다. 본 실험에 사용한 Chipcon CC2420, CC2430의 경우 RSSI값은 RSSI.RSSI_VAL 레지스터에 저장되며 다음과 같이 계산된다. $RSSI_VAL + RSSI_OFFSET$ [dBm]. 이 때, $RSSI_OFFSET$ 는 시스템을 개발하는 과정에서 실험적으로 얻어지며 약 -45의 값을 가진다.

LQI는 수신한 패킷의 세기나 품질을 특성화 한 것으로, 실험에서 사용한 Chipcon CC2420, CC2430의 경우 SFD (start frame delimiter) 이후에 따르는 8개의 심볼을 이용하여 계산된다. 이것은 "chip error rate"로 볼 수도 있다. IEEE 802.15.4 표준화 문서 [21]에 따르면 LQI값은 0에서 255 사이의 값을 가지며, 적어도 8개의 서로 다른 값을 가져야 한다고 정해져 있다. 최대/최소값 사이에서 정규 분포를 따르도록 설정되며, RSS 값과 correlation value를 이용하여 LQI 값을 구하는 것이 가능하다.

본 실험에서는 LQI를 거리측정의 척도로 사용하였다. 이것에는 다음과 같은 이유가 있다. RF 신호

를 위치추적에 사용하는 대부분의 시스템은 신호의 세기가 거리의 정도와 비례한다는 사실에 근거한다. 즉, 두 노드 간 수신한 신호의 세기가 클수록 노드 간 거리가 가까우며, 반대로 신호의 세기가 약할수록 노드간 거리가 멀다는 사실을 이용하여 위치추적을 한다.

하지만 RSS를 이용할 경우 Srinivasan et al.^[20]가 밝힌 바와 같이 측정치의 변화가 적다는 문제점이 있다. 이것이 문제가 되는 이유는 다음과 같은 상황이 발생할 가능성이 있기 때문이다. 위치추적을 하는 과정에서 거리상 큰 차이가 없는 두 노드에 대한 거리에측 시 RSS는 측정된 값에 있어서 차이를 만들어 내지 못하는 경우가 생길 수 있다. 하지만 RSS에 비해 변화가 많은 LQI는 거리상 작은 차이라 할지라도 값에서 차이를 만들어 내어 좀 더 정확한 측정을 할 수 있도록 해 준다. 또한 Srinivasan은 RSS의 경우, 특정 임계치 (threshold, CC2420의 경우 약 -87 dBm)이상에서는 좋은 결과를 보이지만, 그렇지 않은 경우 Packet Reception Rate (PRR)와 RSS간에 상관관계를 찾을 수 없었다고 밝혔다.

2008년 12월 26일 오후 3시부터 오전 3시까지 12시간에 걸쳐 1분 간격으로 측정한 두 노드간 LQI값의 변화와 20분 간격으로 이동평균을 계산한 결과를 그림 2에 나타내었다. 두 노드는 CC2430칩을 이용하여 자체 제작한 노드이며 (노드의 구성에 대한 자세한 설명은 IV장 2절을 참고) 학과건물 4층 실험실에 배치하였고, 두 노드간 거리는 5m 이다.

그림 6을 통하여 알 수 있는 사실은 다음과 같다. 먼저 전체적으로 LQI값이 일정하지 않다는 것

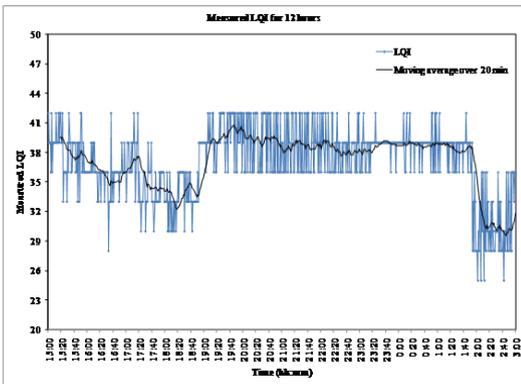


그림 6. 12시간에 걸쳐 1분 간격으로 측정한 5미터 떨어진 두 노드간 LQI값의 변화. 검은 실선은 20분 간격으로 LQI값에 대하여 이동 평균을 구한 결과이다.

을 알 수 있다. 이는 large-scale fading으로 인한 눈에 띄는 세기변화뿐 아니라 small-scale fading으로 인한 그리 크지 않은 신호세기의 변화 때문에 초래되는 현상이다. 따라서 측정된 신호세기 값을 그대로 이용하는 것이 아니라 특정한 필터 (filter)를 통하여 어느 정도 안정화된 값을 사용하는 것이 좋다는 결론을 내릴 수 있다. 본 실험에서는 median 필터를 사용한다. 신호세기의 변화와 관련하여 특히 office hour가 끝나는 시간인 19:00시까지는 많은 변동이 있음을 알 수 있다. 이것은 이 동안 발생하는 사람의 움직임이나, 또는 문의 개폐와 같은 주변 환경의 변화로 인하여 신호의 세기가 변하였음을 의미하며 office hour이후 신호세기에 변동이 상대적으로 적다는 사실을 통하여 확인할 수 있다. 오전 1:50을 기점으로 신호의 세기가 작아지는 것을 볼 수 있는데, 이것은 배터리로 동작하는 노드의 전력 감소에 따른 전송전력 감소로 볼 수 있다. 실제로 3:43을 기점으로 더 이상 기록된 데이터가 없는 것으로 보아 이 시점이 노드의 전력이 전부 소모된 시점이라 할 수 있으며 신호 세기의 감소는 배터리 잔량의 감소에 따른 전송전력 감소로 추측할 수 있다.

실험에 사용될 위치추정 정확도의 척도로는 거리오차 (Error distance)를 사용하였다. 이것은 실제 노드가 배치된 위치와 위치추정을 통하여 얻은 위치간 거리 차를 의미하는데, Euclidean distance를 통하여 구한다. n -차원 공간에서, 노드가 배치된 실제 위치를 $P = (p_1, p_2, \dots, p_n)$, 위치추정을 통하여 예측한 위치를 $Q = (q_1, q_2, \dots, q_n)$ 이라고 할 때, Euclidean distance d_E 는 다음과 같이 정의된다.

$$d_E = \sqrt{(p_1 - q_1)^2 + (p_2 - q_2)^2 + \dots + (p_n - q_n)^2}$$

$$= \sqrt{\sum_{i=1}^n (p_i - q_i)^2}$$

VI. 실험 및 분석

본 장에서는 제한된 조건에서 최적의 위치추적을 하기 위하여 고려해야 할 여러 요인을 실험적으로 검토하기 위하여, 다양한 환경하에서 실험을 수행하고 관찰된 결과를 바탕으로 분석하는 과정을 반복하도록 한다.

실험 1: 비콘노드 수와 정확도와의 관계

1) 실험목적

이번 실험의 목적은 정해진 공간 내에서 비콘노드 수의 변화가 위치추정 정확도에 어떤 영향을 미치는지를 관찰하기 위한 실험이다. 비콘노드의 수가 많을수록 신호세기에 따른 거리 데이터가 많아져서 정확도가 증가할 것 같지만 정해진 공간에서 비콘노드가 일정수준 이상으로 증가하면 노드간 경쟁 또는 간섭이 크게 증가하여 패킷 충돌 또는 손실이 발생할 가능성이 높아지며 경우에 따라 특정 노드가 전송기회를 거의 가지지 못하는 형평성/기아 문제가 발생할 수도 있다. 게다가 센서노드의 경우 가격이 저렴하다고 하지만 광범위한 지역에 노드를 배치하는 경우와 같이 매우 많은 수의 노드를 필요로 하는 경우가 발생할 수 있다. 따라서 이러한 경우 정해진 비용으로 최적의 결과를 내기 위해서는 배치해야 할 노드의 개수를 정하는 것이 비용적인 측면에서 중요한 문제가 된다. 이에 정해진 공간 내에서 최적의 노드 수를 찾아내는 것은 위치추적이 있어서 중요한 문제라 할 수 있다.

2) 실험설계

4.65m X 6.00m의 고정된 넓이를 가지는 공간에 비콘노드의 수를 3개부터 시작하여 1개씩 증가시키며 배치하여 위치추적 오차를 측정한다. 각 실험에 사용된 비콘노드의 수와, 해당 비콘노드의 집합은 표 1과 같다.

테스트베드의 전체적인 레이아웃과 각 비콘노드의 위치에 관한 정보는 그림 7을 통하여 알 수 있다.

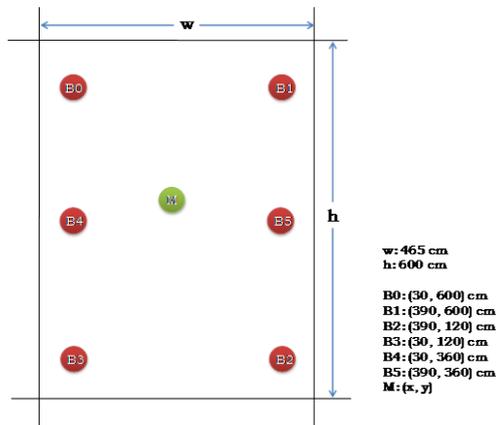


그림 7. 실험에 사용된 테스트베드의 전체적인 레이아웃 및 각 비콘노드의 위치정보

표 1. 실험 1에 사용된 비콘노드의 수 (n)와, 해당 비콘노드의 집합 (S)

비콘노드의 수 n	비콘노드 집합 S
$n = 3$	$S = \{B0, B1, B2\}$
$n = 4$	$S = \{B0, B1, B2, B3\}$
$n = 5$	$S = \{B0, B1, B2, B3, B4\}$
$n = 6$	$S = \{B0, B1, B2, B3, B4, B5\}$

3) 실험 결과 및 분석

위의 표 1 및 그림 7의 설정을 바탕으로 위치추적 실험을 한 결과를 통하여 얻은 비콘노드 수에 따른 위치추정 오차의 변화는 표 2 와 같다.

표 2에 나타난 실험결과를 보면 비콘노드의 수가 5개 일 때 까지는 비콘노드의 수와 위치추적 오차가 반비례하는 양상을 보임을 알 수 있다. 하지만 비콘노드의 수가 6개가 되면 이전의 5개 일 때 보다 약간 증가된 오차 값을 가지는 것을 알 수 있다. 이러한 현상에 대한 원인으로 다음과 같은 2가지 측면을 생각해 볼 수 있다.

- 비콘 수 증가에 따른 경쟁 (contention)의 증가

비콘노드 수의 증가는 일차적으로 전체 네트워크의 경쟁을 높인다. CSMA방식의 MAC 프로토콜을 사용하는 random 네트워크 환경에서는 경쟁 노드 수의 증가는 자연스럽게 채널 획득 확률 (channel access probability)을 떨어뜨리게 된다. 따라서 임의의 한 노드는 다른 노드에 비하여 높은 빈도로 채널을 획득하고, 반대로 다른 노드는 낮은 빈도로 채널을 획득하는 경우가 발생할 수 있다. 또한 최악의 경우 이러한 불평등 (unfairness)현상이 심화 된다면 특정 노드는 거의 채널을 획득하지 못하여 굶주림 (starvation)을 겪게 될 수 있고 이러한 경우 신호세기-거리 정보를 다양하게 획득하지 못하여 부족한 정보만을 가진 채 위치추정을 해야 하는 상황이 발생할 수 있다. 따라서 비콘노드의 수가 증가하는 것이 반드시 정확도의 향상을 불러오는 것은 아니다.

표 2. 비콘노드 수에 따른 위치추적 오차의 변화.

비콘노드의 수 n	위치추적 오차 d
$n = 3$	$d = 206.2$ cm
$n = 4$	$d = 130.5$ cm
$n = 5$	$d = 90.5$ cm
$n = 6$	$d = 92.5$ cm

- 비콘노드 수 증가에 따른 연산량의 증가

비콘노드 수의 증가는 전체 네트워크의 연산량을 증가시킨다. 자가설정 위치측정 시스템 내에서 임의의 한 노드가 광고메시지를 전송하면, 해당 데이터를 들은 모든 노드는 코디네이터 노드로 LQI정보를 다시 전송하여 주도록 되어있다. 따라서 만약 네트워크 상의 모든 노드가 전송범위 (transmission range)안에 들어있는 경우 광고메시지와 이에 대한 응답메시지로 인해 초래되는 네트워크 상의 메시지량은 매우 커지게 되고, 이로 인하여 특히 코디네이터 노드는 버퍼 오버플로우 현상을 겪게 될 것이다. 만약 Drop-Tail queue를 사용한다면 최신의 데이터가 버려지게 될 것이다. 이는 이동노드의 위치를 추적하는 경우 최신의 위치를 갱신하는데 많은 지연시간을 초래하는 문제를 야기할 수 있다.

채널 경쟁과 네트워크의 연산량의 증가의 영향에 대하여 자세히 살펴보자. 위치측정의 정확도는 실제 측정 오차인 거리뿐만 아니라 시간에 대한 고려도 추가 되어야 한다. 즉, 현재의 위치가 실시간으로 측정되고 있는지를 고려해야 하는데, 만약 네트워크의 연산량이 많아져서 실시간 위치측정이 지연된다면 전체적인 시스템의 정확도는 떨어지게 된다.

비콘노드와 모바일노드가 주기적으로 방송 메시지를 전송하며, 어떤 메시지가든 메시지를 들은 비콘노드는 해당 메시지에 대한 신호 정보를 코디네이터 노드로 전송 하여야 한다. 위치측정을 위해 설치한 네트워크에 N_b 개의 비콘노드가 있다고 가정하고, 각 비콘노드는 M_b packets/sec의 빈도로 방송메시지를 전송한다고 가정하자. 모든 비콘노드는 서로의 전송 패킷을 들을 수 있다고 가정하자. 한 개의 비콘노드는 초당 M_b 개의 메시지를 생성하고, 각 생성된 메시지는 $N_b - 1$ 개의 이웃하는 비콘노드에 의해서 코디네이터 노드로 전송이 된다. 따라서 한 개의 비콘노드로 인하여 생성되는 전체 패킷의 수는 $M_b(N_b - 1)$ 이다. 네트워크에는 N_b 개의 비콘노드가 존재하므로 $N_b \times M_b \times (N_b - 1)$ 개의 패킷이 생성된다. 또한 N_m 개의 모바일노드가 존재한다고 가정하고, 각 모바일노드는 M_m packets/sec 의 빈도로 메시지를 생성한다고 가정하자. 모바일노드간에는 신호측정을 하지 않으므로 N_m 개의 모바일노드의 메시지 전송으로 인하여 생성되는 메시지의 개수는 $N_m \times N_b \times M_m$ 개 이다. 따라서 전체 네트워크에서 발생되는 패킷의 수는

$$\{N_b \times M_b + N_b \times M_b(N_b - 1)\} + \{N_m \times M_m + N_m \times N_b \times M_m\}$$

이다. 하지만 이 중에서 코디네이터로 전송되는 노드의 수는

$$N_b \times M_b(N_b - 1) + N_m \times N_b \times M_m$$

이며 생성되는 패킷의 대부분을 차지한다. 센서네트워크의 좁은 대역폭과, 코디네이터 노드의 네트워크 버퍼 크기를 고려한다면 많은 연산량은 실시간 위치측정을 불가능 하게 한다는 것을 쉽게 알 수 있다. 이번 실험을 통하여 우리는 실험을 실시한 테스트베드 환경하에서는 5개의 비콘노드를 사용하여 위치추적을 하는 것이 최적이라 판단하였다.

실험2: 위치측정에 사용한 시간과 정확도와의 관계

1) 실험목적

이번 실험의 목적은 초기화 이후 위치측정에 사용된 시간에 따른 위치측정 정확도의 변화를 보고자 하는 것이다. 물론 무선링크가 안정화되는 데에는 일정한 시간이 필요하며 링크안정화에 많은 시간을 들일수록 위치측정의 정확도는 올라갈 것이다. 따라서 위치측정에 사용한 시간과 위치측정의 정확도는 비례한다고 할 수 있다. 하지만 이때 중요한 것은 일정수준의 정확도를 보장하는데 드는 시간이 얼마나 짧은 가이다. 즉, 임의의 위치측정 정확도 임계치를 σ 라 할 때, σ 의 정확도를 만족하는데 소요되는 시간이 일정수준(τ) 이하임을 보장하는 위치추적 알고리즘이 필요한 응용분야가 있다. 예를 들어 위치추적 기술이 Emergency Network에 사용된 경우, 재난상황에서 응급환자의 위치를 파악하는데 너무 많은 시간을 소요해서는 안 될 것이다. 본 실험은 σ 의 설정에 따른 τ 의 변화를 관찰하기 위한 것이다.

2) 실험설계

테스트베드의 구축은 이전실험 (실험1)과 동일하며 사용한 비콘은 B0-B4이다. 이와 같은 환경하에서 위치를 측정하고자 하는 모바일노드의 전원을 켜 순간부터 (즉 노드가 초기화 된 이후로) 시간의 흐름에 따른 위치추적 오차의 변화를 관찰하였다.

3) 결과 및 분석

이번실험을 통하여 측정된 결과를 그림 8에 나타

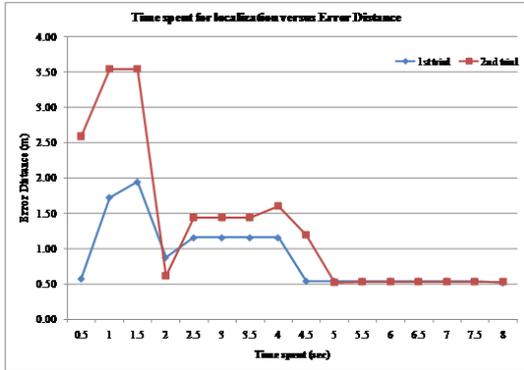


그림 8. 위치추정에 소요한 시간에 따른 위치추정 오차의 변화.

내었다. 그림 8을 통하여 알 수 있는 사실은 다음과 같다. 첫째는 두 번의 실험 모두에서 위치추정 결과는 같은 양상을 보였다는 점이다. 두 결과 사이에 스케일상의 차이는 있지만 두 결과가 보이는 패턴은 크게 다르지 않음을 알 수 있다. 이것은 두 실험 모두 같은 위치에 놓인 노드의 위치를 추적하는 실험을 반복하여 수행하였기 때문이다. 즉, 비록 불안정한 무선 링크라 할지라도 어느 정도의 반복성은 보장함을 알 수 있다. 두 번째는 현재의 시스템구성 하에서는 안정적인 위치추적을 위하여 약 4.5-5.0초의 시간이 필요함을 알 수 있었다. 물론 2.5-3.5초 사이에서도 안정적인 결과를 보이는 구간을 확인할 수 있다. 하지만 이 구간에서 보이는 위치추정 결과의 정확도는 그리 높지 않으며 또한 오랫동안 지속되는 양상을 보이지 않았다. 따라서 이 구간을 안정화 구간이라 판단하는 것은 무리가 있을 것으로 판단하였다.

이번 실험을 통하여 위치추정 시 50cm의 오차를 보장하는데 약 4.5-5.0초의 시간이 소요된다는 결론을 내렸다.

실험 3: 시스템 설정에 사용된 파라미터와 정확도와의 관계

1) 실험 목적

위치추정 실험을 하는 과정에서 변경할 수 있는 여러 파라미터가 있다. 예를 들어 노드가 사용하는 주파수 대역이나 또는 전송 전력의 세기 등이 그것인데, 본 실험은 이러한 파라미터가 위치추정 정확도에 어떠한 영향을 미치는지를 관찰하기 위한 것이다.

2) 실험설계

기능상 제약이 많은 센서노드를 통하여 실험을 하는 만큼, 실제 변경하여 실험을 수행하여 볼 수 있는 파라미터에는 많은 제약이 있었다. 실험을 통하여 확인하려 계획한 파라미터는 총 3가지이다.

- 각 노드의 최대 큐 길이
- 각 노드가 사용하는 주파수
- 각 노드가 사용하는 전송 전력의 세기

하지만 본 논문에서는 c) 항만을 다루고자 하며 그 이유는 다음과 같다. a) 항의 경우 별도의 실험을 통하여 최대 큐 길이는 위치추정의 정확도와 비례함을 확인할 수 있었다. 하지만 이러한 현상은 전체 네트워크상의 노드 수가 적은 경우 성능향상을 보이지 않거나 매우 미약한 수준의 성능향상을 보였으며 또한 노드수가 어느 정도 많아진다고 하더라도 각 노드가 광고 메시지를 전송하는 주기 (time interval)를 조절하여 어느 정도 해결할 수 있었다. 즉, 큐 길이를 조절하는 것 외의 다른 방법으로 해결할 수 있는 문제였다. 또한 큐의 길이를 크게 하는 경우 발생하는 문제점으로 이동노드의 경우 최신 위치 갱신 지연시간이 길어진다는 점이다. 큐의 길이가 길어질 경우 버려지는 패킷의 수는 적지만 최근에 수신된 패킷이 처리되는데 까지 많은 시간을 기다려야 하는 문제를 야기하여, 이동노드의 위치를 추적하는 실험의 경우 최신의 위치정보 갱신이 늦어지는 문제를 초래하였다. 이와 같은 이유로 a)항의 실험 결과를 포함하지 않았다.

b) 항의 경우 현재 사용하는 주파수 대역의 인접 대역을 사용하는 다른 네트워크가 있는 경우, 서로 간에 간섭을 일으켜 네트워크에 몇몇 문제를 야기하는 문제가 있지만 이번 실험의 경우 이러한 경우는 고려하지 않았다. 따라서 다른 대역에서 실험을 하여도 어떠한 변화를 관찰할 수 없었다. 이에 본 실험도 논문에서 제외하도록 한다.

3) 결과 분석

각 노드가 사용하는 전력의 차이에 따른 위치추정 정확도의 변화에 대한 실험결과는 아래의 표 3을 통해 확인할 수 있다.

표 3에서 확인할 수 있듯이 높은 전송전력을 사용하는 경우 더 높은 정확도를 얻을 수 있음을 알 수 있다. 이것은 다음과 같은 2가지의 원인 때문이다. 첫째, 전송전력이 높을수록 성공적으로 패킷이 성공적으로 수신될 확률 (Packet Reception Rate: PRR) 이 높아진다. 전송전력이 낮은 경우 손실률이

표 3. 노드의 전송 전력에 따른 위치추정 정확도의 변화.

	High power (0 dBm)	Low power (-25 dBm)
1st trial	132.9	216.3
2nd trial	87.7	218.4
3rd trial	112.7	270.6

(단위: cm)

높은 무선링크 상에서 패킷이 드롭될 확률 (Packet Drop Rate: PDR)이 높다. 따라서 높은 전송전력을 사용하여 PRR을 높이는 것이 더 좋은 결과를 보장한다 (물론 최적의 전송전력을 선택하여 concurrent transmission의 수와 높은 PRR를 보장하는 것도 생각해 볼 문제이지만, concurrent transmission 문제는 논외로 하기로 한다). 둘째, 높은 전송전력을 이용하는 경우가 그렇지 않은 경우에 비하여 더 정확한 신호세기-거리 정보를 제공한다. 신호의 세기가 약한 경우 두 노드간 거리가 멀어지면 신호가 도달하지 못하는 경우가 발생할 수 있다. 하지만 신호의 세기가 세다면 비교적 먼 거리의 노드에 대하여서도 신호세기-거리 정보를 제공할 수 있을 것이고, 이러한 정보의 양이 많다면 더 정확한 위치추적을 할 수 있을 것이므로 전송신호의 세기는 위치추정 정확도와 비례하는 경향이 있다고 할 수 있다.

이번 실험을 통하여 제한적이거나 전송전력의 세기는 위치추정 정확도와 비례하는 경향을 보인다고 결론 내릴 수 있었다.

실험 4: 위치추적 오차를 유발하는 환경적 요인과 그 해결책에 관한 실험

1) 실험목적

이번 실험은 위치추적 과정에서 발견된 오차를 유발하는 환경에 대한 분석과 또한 그러한 환경적 요인을 극복하기 위한 해결책을 제시하기 위한 실험이다. 위치추정에 사용하는 알고리즘에 따라 동일한 조건 하에서도 상이한 수준의 정확도를 제공할 수 있다. 자가설정 위치추정 시스템의 경우도 같은 수의 비콘노드를 사용한다 할지라도 서로 다른 수준의 정확도를 보이도록 테스트베드를 구성할 수 있는데, 이번 실험은 이와 같은 사실을 확인하고 더 나은 결과를 보이는 배치를 찾고자 하는 실험이다.

2) 실험설계

이번 실험은 2가지로 구성된다. 첫 번째는 3개의

비콘노드를 이용하여 위치추적을 하는 경우 더 나은 테스트베드 구성을 찾는 실험이고, 두 번째는 4개의 비콘노드를 이용하여 위치추적을 하는 경우 더 나은 테스트베드 구성 찾는 실험이다. 5개 이상의 비콘노드를 사용하는 경우 실험결과 비콘노드의 배치에 따라 위치추적 오차가 크게 발생하는 경우가 드물기 때문에 3개와 4개의 비콘을 사용하는 경우에 한정하여 실험을 하도록 한다. 각 배치된 노드의 위치 정보는 그림. 7을 통하여 확인할 수 있다.

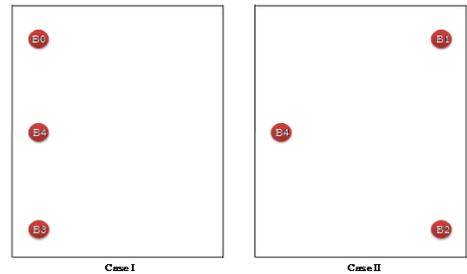


그림 9. 비콘노드 3개를 이용하여 위치추적 하는 경우 가능한 두 가지 노드 배치방법

- Set 1: 노드 3개를 이용한 위치추적

테스트베드에서 비콘노드 3개를 배치하는 방법에는 여러 가지가 있을 수 있겠지만 간단히 그림 9와 같은 두 가지의 경우를 생각해 볼 수 있다. 왼쪽의 Case I의 경우 3개의 비콘노드를 단순히 일렬로 배치하였고, 오른쪽의 Case II는 3개의 비콘노드를 삼각형의 형태로 배치하였다. 삼각측량을 이용하여 위치추적을 한다는 사실에 기반하여 볼 때, 오른쪽의 Case II가 더 좋은 결과를 보일 것이라고 쉽게 예측할 수 있다. Set 1은 이를 확인해 보고자 함이다.

- Set 2: 노드 4개를 이용한 위치추적

4개의 비콘노드를 이용하여 테스트베드를 구성하는 여러 경우의 수 중 그림 10과 같이 두 가지들

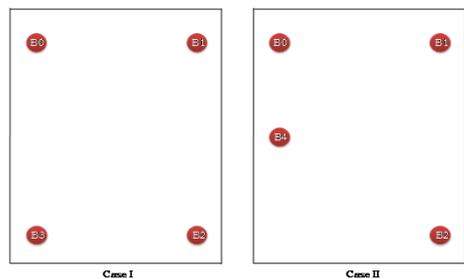


그림 10. 비콘노드 4개를 이용하여 위치추적 하는 경우 가능한 두 가지 노드 배치방법

생각해 볼 수 있다. Set 2의 경우 더 좋은 구성을 선택하는 것이 Set 1에 비해 좀더 난해하다. 이번 실험의 목적은 이를 확인하여 보고자 함이다.

3) 결과 및 분석

- Set 1: 노드 3개를 이용한 위치추적

노드 3개를 그림 9의 두 가지 배치방법을 통하여 위치추적을 실시한 결과는 다음의 표 IV과 같다.

표 4를 통해 알 수 있듯이, 삼각측량을 이용하여 위치추적을 하는 알고리즘의 경우 일렬로 비콘노드를 배치하는 것은 낮은 수준의 정확도만을 보장한다는 것을 알 수 있다. 따라서 이번 실험을 통하여 3개의 비콘노드를 이용하여 위치추적을 하는 경우 3개의 노드가 일렬로 배치되지 않도록 하는 것이 더 나은 결과를 보장한다는 결론을 얻을 수 있었다. 이는 삼각측량 기반의 어떠한 위치추정 알고리즘에 동일하게 적용되는 바이다.

표 4. 비콘노드 3개를 이용하여 위치추적을 하는 경우, 배치 방법에 따른 정확도 차이.

노드 배치 방법	위치추적 오차 (단위: cm)
Case I	228.7
Case II	198.2

- Set 2: 노드 4개를 이용한 위치추적

노드 4개를 그림 10의 두 가지 배치방법을 통하여 위치추적을 실시한 결과는 표 5와 같다.

Case I의 경우 비콘노드가 균등하게 배치되어 있고, Case II의 경우 상대적으로 불규칙적으로 배치되어있다. 표 V를 통하여 알 수 있듯이, 비콘노드를 불규칙적으로 배치한, 즉 비콘노드 사이의 거리가 다양하게 분포되어있는 Case II의 경우 더 높은 정확도를 보인다. 이는 다음과 같은 이유 때문이다. Case I의 경우 비콘노드가 비교적 균일하게 분포되어 있다. 즉, $d(A,B)$ 를 노드 A와 노드 B간의 Euclidean distance라고 할 때, Case I의 테스트 베드 구성에서 얻을 수 있는 서로 다른 거리 정보는 다음의 3가지 밖에 없다.

표 5. 비콘노드 4개를 이용하여 위치추적을 하는 경우, 배치 방법에 따른 정확도 차이.

노드 배치 방법	위치추적 오차 (단위: cm)
Case I	136.9
Case II	77.9

$$\textcircled{1} d(B0, B1) = d(B3, B4)$$

$$\textcircled{2} d(B0, B3) = d(B1, B2)$$

$$\textcircled{3} d(B0, B2) = d(B1, B3)$$

하지만 Case II의 경우 얻을 수 있는 서로 다른 거리정보는 Case I의 2배인 다음의 6가지이다.

$$\textcircled{1} d(B0, B1)$$

$$\textcircled{2} d(B0, B4)$$

$$\textcircled{3} d(B0, B2)$$

$$\textcircled{4} d(B1, B4)$$

$$\textcircled{5} d(B1, B2)$$

$$\textcircled{6} d(B2, B4)$$

두 배 더 많은 신호세기-거리 정보를 가진 Case II의 네트워크가 Case I의 네트워크에 비하여 더 높은 수준의 정확도를 보장하는 것은 이와 같은 이유에서이다.

이번 실험을 통하여 정규적이지 않고 불규칙적으로 (여기서 불규칙하다는 말의 의미는 각 노드간 거리값이 다양하게 분포되어 있음을 의미한다) 배치된 비콘노드를 가진 네트워크가 더 높은 수준의 위치추정 정확도를 보장한다는 결론에 도달할 수 있었다.

본 논문에서 수행한 실험은 다소 제한적인 환경에서 수행했다고도 볼 수 있다. 하지만 이 실험결과를 LOS/NLOS가 혼재한 일반적인 환경에서도 동일하게 얻을 수 있다. 본 실험에 사용한 자가추정 위치추적 시스템의 경우 가장 높은 신호세기를 보이는 몇몇의 비콘노드를 동적으로 선택하고, 선택된 비콘노드의 SDM 정보를 이용하여 위치추정을 한다. 따라서 NLOS에 있는 비콘노드의 경우 위치추정에 사용되지 않게 되고, 따라서 자가추정 시스템의 경우 항상 LOS 상에 존재하는 비콘노드만을 이용하여 위치추정을 한다. 이로 인하여, 일반적인 실내 환경에서 위치추정을 실시한다고 하더라도 본 논문에서 실시한 실험과 같은 결과를 보일 것이다.

Ⅶ. 결 론

전쟁, 의학, 공공안전 등 새로운 응용분야의 등장과 더불어 위치추적 기술에 더 높은 수준의 정확도가 요구되고 있다. 다양한 방법의 위치추적기술이 연구 및 개발되었지만 본 논문은 그 중에서 별도의 추가 시스템이나 동기화를 필요로 하지 않으며, 범용적으로, 특히 실내에 사용하기 가장 적합한 RF 신호를 이용한 위치추적 기술에 대한 이론적, 그리고 실험적 연구를 실시하였다. 이를 위하여 학과건물 4층에 CC2430 칩을 이용하여 자체 제작한 노드

를 이용하여 테스트 베드를 구축하였으며, 위치추적 알고리즘을 구현하여 실험에 활용하였다.

본 논문은 자가설정 위치측정 시스템에 대한 이론적 접근은 물론 실험을 통하여 다각적인 접근을 수행하였다. 이 과정에서 고정된 공간에서 보다 높은 수준의 위치추적 정확도를 보장하기 위해 고려해야할 여러 외부적, 내부적 환경에 대한 분석을 수행하였다. 노드의 개수, 전송 전력의 세기, 안정화 상태로 가기까지 소요되는 시간, 같은 수의 노드를 사용하여 더 높은 정확도를 보장하는 배치 방법에 대한 연구를 통하여 위치추적의 정확도를 결정하는 요인에 대한 다각적 성찰을 해 볼 수 있었다.

이후 연구 계획은 이동하는 노드의 위치추적 정확도 향상이다. 본 논문에서는 구체적으로 다루고 있지 않지만 이동노드의 경우, 높은 정확도와 빠른 정보 갱신주기를 보장하는 것은 매우 어려운 일이다. 따라서 현재의 고정노드 연구를 확장하여 이동노드의 경우에 적용하고, 높은 정확도와 빠른 갱신주기를 보장하는 것이 앞으로 나아가야 할 연구 방향이다.

참 고 문 헌

[1] Hyuk Lim, Lu-Chuan Kung, Jennifer C. Hou, and Haiyun Luo, "Zero-configuration, robust indoor localization: Theory and experimentation," IEEE INFOCOM 2006, Barcelona, Spain, April 23-29, 2006.

[2] R. Want, A. Hopper, V. Falcao, and J. Gibbons, "The active badge location system," ACM Transactions on Information Systems, vol. 10, no. 1, pp. 91-102, January 1992.

[3] A. Harter, A. Hopper, P. Steggles, A. Ward, and P. Webster, "The anatomy of a context-aware application," in Proc. of ACM MOBICOM, 1999.

[4] N. B. Priyantha, A. Chakraborty, and H. Balakrishnan, "The Cricket location-support system," in Proc. of ACM MOBICOM, 2000.

[5] N. B. Priyantha, A. K. Miu, H. Balakrishnan, and S. Teller, "The Cricket compass for context-aware mobile applications," in Proc. of ACM MOBICOM, 2001.

[6] "Ubisense," <http://www.ubisense.net/>

[7] D. Niculescu and B. Nath, "VOR base stations

for indoor 802.11 positioning," in Proc. of ACM MOBICOM, 2004.

[8] "Pinpoint," <http://www.pinpoint.com/>

[9] T. Li, A. Ekpenyong, and Y.-F. Huang, "A location system using asynchronous distributed sensors," in Proc. of IEEE INFOCOM, 2004.

[10] P. Bahl and V. N. Padmanabhan, "RADAR: An in-building rf-based user location and tracking system," in Proc. of IEEE INFOCOM, 2000.

[11] P. Bahl, V. N. Padmanabhan, and A. Balachandran, "Enhancements to the RADAR user location and tracking system," Microsoft Research, Tech. Rep. MSR-TR-2000-12, February 2000.

[12] M. Youssef and A. Agrawala, "Small-scale compensation for WLAN location determination systems," in Proc. of WCNC, 2003.

[13] P. Castro, P. Chiu, T. Kremenek, and R. Muntz, "A probabilistic room location service for wireless networked environments," in Proc. of Ubiquitous Computing, 2001.

[14] A. Haeberlen, E. Flannery, A. M. Ladd, A. Rudys, D. S. Wallach, and L. E. Kavraki, "Practical robust localization over large-scale 802.11 wireless networks," in Proc. of ACM MOBICOM, 2004.

[15] P. Krishnan, A. Krishnakumar, W.-H. Ju, C. Mallows, and S. Ganu, "A system for LEASE: Location estimation assisted by stationary emitters for indoor RF wireless networks," in Proc. of IEEE INFOCOM, 2004.

[16] A. M. Ladd, K. E. Bekris, A. Rudys, G. Marceau, L. E. Kavraki, and D. S. Wallach, "Robotics-based location sensing using wireless ethernet," in Proc. of ACM MOBICOM, 2002.

[17] P. Tao, A. Rudys, A. M. Ladd, and D. S. Wallach, "Wireless LAN location-sensing for security applications," in Proc. of ACM Workshop on Wireless Security, 2003.

[18] S. Ganu, A. S. Krishnakumar, and P. Krishnan, "Infrastructure-based location estimation in WLAN networks," in Proc. of WCNC, 2004.

[19] Y. Gwon and R. Jain, "Error characteristics and calibration-free techniques for wireless LAN-based location estimation," in Proc. of

ACM MobiWac, October 2004.

- [20] Kannan Srinivasan and Philip Levis, "RSSI is Under Appreciated," Third Workshop on Embedded Networked Sensors (EmNets 2006), 2006.
- [21] IEEE Std 802.15.4-2006. Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs), 2006, pp.65.
- [22] Texas Instrument. Web: <http://www.ti.com>
- [23] Texas Instrument. CC2430 Data Sheet. Available at web: <http://www.ti.com/lit/gpn/cc2430>
- [24] CrossBow Technology. Available at web: <http://www.xbow.com>

김 태 운 (Taewoon Kim)

준회원



2008년 2월 부산대학교 정보컴퓨터공학과
 2009년 3월~현재 광주과학기술원 정보통신공학과 석사과정
 <관심분야> 무선 통신 및 네트워킹, 매체접근제어 프로토콜 디자인 및 성능분석

최 우 열 (Wooyeol Choi)

준회원



2008년 2월 부산대학교 정보컴퓨터공학과
 2009년 3월~현재 광주과학기술원 정보통신공학과 석사과정
 <관심분야> 무선 통신 및 네트워킹

임 혁 (Hyuk Lim)

정회원



1996년 2월 서울대학교 전기공학 학사
 1998년 2월 서울대학교 전기공학 학사 석사
 2003년 8월 서울대학교 전기 및 컴퓨터공학과 박사
 2003년~2006년 (미) Univ. of

Illinois at Urbana-Champaign (Illinois) 박사후 연구원

2006년~현재 광주과학기술원, 조교수
 <관심분야> 네트워크 모델링, 센서/메시 네트워크 성능분석 및 평가, 유비쿼터스 컴퓨팅