

무선 센서 네트워크 상에서 정확도를 고려한 효과적인 도래시간 기반 무선실내측위방법

고 승 렬*

Effective ToA-Based Indoor Localization Method Considering Accuracy in Wireless Sensor Networks

Seungryeol Go*

요 약

본 논문은 실내 환경에서 정확도를 고려한 효과적인 도래시간 기반 무선 측위 방법을 제안하였다. 위치 측위의 목적은 타겟의 위치를 추정하는 것이다. 실내 환경에서 타겟의 정확한 위치를 추정하는 것은 다양한 오류들 때문에 어렵다. 무선 측위의 정확성은 비가시성 오류에 큰 영향을 받는다. 도래시간 기반 측위는 수신기와 3개 이상의 송신기 들 사이에서 거리 값을 이용하여 위치를 추정한다. 그러나 송신기와 수신기의 위치에 따라 장애물들로 인해 각각의 비가시성 오류도 다르다. 수신기의 위치를 정확하게 추정하기 위해서는 최적화된 위치 측위 방법이 필요하다. 본 논문은 무선 센서 네트워크에서 정확도를 높이기 위한 효과적인 측위 방법을 제안한다. 측위 시스템의 정밀도를 높이기 위해 거리 측정 단계에서의 거리 값을 보정하는 방법과 비가시성 환경에서 발생하는 오차들을 최소화시켜 효율적으로 송신기들을 선택하는 알고리즘을 제안하여 성능을 향상시켰다. 제안한 방법의 성능 평가는 다양한 오차들이 존재하는 실제 환경에서의 실험들로 인해 제시되었고, 실험적인 결과들은 기존의 방법과 제안된 방법을 가진 측위 절차의 추정 오차 결과들의 비교를 통해 측위 시스템의 정확도가 향상된 것을 증명하였다.

Key Words : Location based service, Localization, Location Estimation, Non-line of sight, Time of arrival

ABSTRACT

We propose an effective ToA-based localization method considering accuracy in indoor environments. The purpose of the localization system is to estimate the coordinates of the geographic location of target device. In indoor environments, accurately estimating the location of a target device is not easy due to various errors. The accuracy of wireless localization is influenced by NLOS errors. ToA-based localization measures the location of a target device using the distances between a mobile device and three or more base stations. However, each of the NLOS errors along a distance estimated from a target device to a base station is different because of dissimilar obstacles. To accurately estimate the target's location, an optimized localization process is needed in indoor environments. In this paper, effective ToA-based localization method process is proposed for improving accuracy in wireless sensor networks. Performance evaluations are presented, and the experimental localization system results are proved through comparisons of various localization methods with the proposed methods.

* First Author : Agency for Defense Development (ADD), seungryuls@nate.com, 정희원
 논문번호 : KICS2016-04-062, Received April 21, 2016; Revised June 6, 2016; Accepted June 7, 2016

1. 서 론

2009년 아이폰 도입을 시작으로 국내 시장 뿐만 아니라 국외 시장에서도 스마트폰의 대중화는 이동통신시장 뿐만 아니라 미래의 유비쿼터스 시대에 더욱 접근하게 하였다. 정보화·컴퓨터 시대에서는 무선 네트워크 망에 설치된 여러 기지국과 무선 디바이스 간의 통신 기술들은 일상생활에서 다양하게 활용할 수 있다. 무선통신 기술이 발달하고 응용 분야가 더욱 넓어지면서 WI-Fi, AM/FM 라디오, RFID (Radio Frequency Identification), 무선 센서 네트워크, 이동통신 등을 이용하여 적용 가능한 무선 측위 기술 연구가 매우 활발히 진행되고 있다^[1]. 위치 인식을 기반으로 하는 기술들은 많은 분야에서 적용이 가능한데, 예를 들어 응급상황서비스, 대 테러 진압작전, 항법시스템, 미사일의 위치 추적, 항공 교통 시스템, 로봇의 경로탐색 등 의료 및 군사, 항법, 항공분야에서 적용이 가능할 뿐 아니라 다양한 곳에서도 적용이 가능하다. 실생활에서의 활용도는 무선 센서 네트워크가 설치된 차량이나 사람들의 현재 위치를 분석하여 목적지를 안내하거나, 날씨 안내, 생활 정보 안내, 상품 안내 등이 위치기반서비스 (Location Based Service)으로 적용되어 이용자에게 많은 정보들과 서비스들을 제공하고 응용분야는 앞으로도 더욱 생길 전망이다. 그 중 대표적인 응용분야로는 측위 시스템을 들 수 있다.

측위 시스템은 크게 실외와 실내에서 이용하는 측위 시스템으로 나눌 수 있다. 실외환경에서는 GPS (Global Positioning System) 신호를 이용하는 측위 시스템이 대표적이다. GPS 위성들로부터 전송받은 무선 통신 신호를 이용하여 무선 단말기에 자신의 위치를 파악할 수 있다. 대표적인 예로는 차량 네비게이션에 적용되어 서비스 이용자에게 목적지까지 경로 안내의 서비스를 제공한다. 그러나 실내 환경에서는 GPS신호가 도달하지 못해 사무실이나 지하 주차장, 지하철 역, 복지 시설 및 마트 등에서는 적용이 어렵다^[2]. 실내 측위 시스템은 기지국을 설치하여 무선통신을 이용한 여러 측위 방법들이 제안되어 왔다. 첫 번째로는 3개 이상의 송신기가 설치되었을 때 무선 신호의 전달 시간을 이용하는 ToA (Time of Arrival) 측위 방법이 있다. ToA를 이용하는 방법은 3개 이상의 위치를 알고 있는 송신기에서 수신기 간의 무선 신호의 비행시간 (ToF: Time of Flight)을 측정하여 빛의 속도와 곱하여 송신기와 수신기 사이의 거리를 계산한다. 계산된 3개 이상의 거리를 삼변측량 (Trilateration)과 같은 여러 위치 측정 방법을 이용하

여 수신기의 최종 위치를 추정할 수 있다. 두 번째 측위 방법으로는 송신기와 수신기 간의 무선 신호의 무선 신호의 시간 차이를 이용하는 TDoA (Time Difference of Arrival) 측위 방법이 있다. 그리고 송신기와 수신기 간의 무선 신호의 전달 각도를 기반으로 하는 AoA (Angle of Arrival)를 이용한 측위 방법이 있다. 마지막으로 위치에 따른 신호의 세기를 이용하는 RSSI (Received Signal Strength Indicator) 측위 방법이 있다^[3].

본 논문에서는 ToA를 기반으로 하는 측위 방법에서 위치 정확도 향상을 위한 방법을 제시한다. 실외 환경에서의 측위 시스템은 GPS 위성이 대기권 밖의 우주상에 위치하고 있어서 가시성 (LOS: Line of Sight)을 보장하기 쉽다. 그러나 실제 실내 환경에서는 두꺼운 벽이나 기둥, 사람, 철제 구조물 등과 같은 다양한 장애물들 때문에 생기는 비가시성 (NLOS: Non Line of Sight)에서는 위치 추정 정확도가 낮아진다는 단점을 가지고 있다^[4]. 따라서 이러한 문제점을 해결하기 위한 방법으로 무선 센서 네트워크 환경 안에서 비가시성 환경에서의 위치 추정 정확도를 높이기 위해 효과적인 거리측정방법과 송신기 선택 방법을 제시하여 무선 측위의 정밀도를 높이고자 하였다. 실내에서 소수의 (예를 들어 3개 ~ 10개 정도)의 송신기를 설치하여 위치 서비스를 제공하려는 기관들과 통신회사들이 많이 존재 한다. 송신기의 설치 위치에 따라 가시성 및 비가시성 환경이 결정되어 계산된 위치에는 위치 추정의 오차 량이 생길 수 있다^[5]. 그래서 본 논문에서는 여러 무선 송신기들 중에서 위치 추정의 정확도를 높이며 광범위의 무선 통신 구역에서 효과적으로 측위를 하기 위해서 필요한 거리측정의 보정 방법을 제시하여 ToA를 기반으로 하는 측위 방법에서 거리측정을 향상시키고 송신기를 효율적으로 선택하는 방법을 제시하여 효과적인 측위시스템을 제안하고자 한다. 무선 센서 네트워크 환경 안에서 정확한 측위를 하기 위해 본 논문에서는 무선 장치의 하드웨어적인 특성으로 인해 발생하는 거리 오차를 보정할 수 있는 방법을 제안하여 송신기와 수신기 간의 오차 값을 가진 측정되는 거리를 조정하여 측위 시스템에서의 거리 정확도를 높였고, 다수의 송신기들이 설치되어 있는 환경에서 ToA 측위 추정을 할 때 발생하는 ToA 측위 원들의 겹쳐지는 영역 (측위 오차 영역)을 최소화하는 송신기 3개를 선택하는 방법을 수학적 방법으로 제안하여 비가시성 환경에서의 ToA 측위 시스템에서 찾고자 하는 수신기의 위치 측정을 효율적으로 선택할 수 있는 방법을 제안하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 우선 II장에서는 실내 측위를 위한 무선 센서 네트워크 환경에서 발생하는 비가시성 환경에 대해 살펴보고, III장에서는 ToA를 기반으로 하는 측위방법에 대해 기술하였다. IV장에서는 그동안 연구되어 온 자주 쓰이는 ToA 측위 방법들에 대해 설명할 것이고, V장에서는 도래시간을 기반으로 하는 실내 측위의 정확도 향상을 위해 제안된 측위 알고리즘의 절차를 기술하였다. VI장에서는 제안하는 알고리즘의 성능 평가를 위한 시뮬레이션 결과를 설명하고 마지막으로 VII장에서 결론을 맺는다.

II. 비가시성 환경에서의 실내 측위 방법

무선 측위를 적용하기 위한 실내 환경에서는 다양한 장애물들의 존재 때문에 생기는 비가시성 오류들로 인해 위치 추정의 정확도에 오차가 있는 문제가 존재한다. 예를 들어 그림 1은 비가시성 오류를 가진 실내 환경에서 3개 이상의 송신기와 수신기 사이의 무선 신호 전파를 나타내었다. ToA를 기반으로 하는 무선 신호에서 무선 장치 간의 신호를 전파하기 위해서는 가시성 환경에서 주변의 환경적인 영향이 없이 정확한 시간에 신호가 전달되어야 한다. 그러나 그림 1에서와 같이 일상 환경에서는 송신기 (BS: Base Station) 와 수신기 (MS: Mobile Station) 간의 무선 신호는 두꺼운 벽이나 기둥, 철물 구조, 사람 등과 같은 장애물로부터 신호가 통과하는데 영향을 받아서 도착 시간이 늦어지는 오차가 생길 수 있고, 다중 경로 (multipath) 환경에서의 반사 신호로 인해 도착 시간에 영향을 받거나 벽에 의한 차단된 신호는 무선 통신 환경에서 신호의 도착시간을 기반으로 하는 ToA 측위를 하는데 상당한 오차를 발생시킨다. 그리고 무

선 통신 환경에서 신호의 간섭으로 인해 정확한 신호를 감지하기에는 어려운 점이 존재하여 실내 환경에서 무선 측위 시스템의 정확도를 높이는 것은 어렵다.

비가시성 환경에서는 위에서 설명한 오류에 영향을 받은 무선 신호의 도착하는 전파시간을 정확하게 감지하는 것은 어렵다. 예를 들어 비가시성 오류가 발생하였을 때, ToA 기반 방법에서의 무선 신호의 빠른 속도 (3.0×10^8 m/s) 때문에 1-나노 초(ns)에서는 약 30 cm의 거리 측정 오류가 생긴다. 그렇기 때문에 본 논문에서는 비가시성 오류는 도착시간이 지연되어 수신이 되기 때문에 항상 0보다 큰 값을 가지는 양의 값이라고 가정을 하고 기술하였다. 비가시성 오류 값 b_i 는 송신기와 목표가 되는 수신기 사이의 무선 신호의 전파가 장애물로 인해 항상 0이 아닌 값을 가지고 식 (1)에서와 같이 기술하였다.

$$b_i = \begin{cases} 0 & i\text{번째 송신기와수신기 간의 가시성 환경} \\ e_i & i\text{번째 송신기와수신기 간의 비가시성 환경} \end{cases} \quad (1)$$

식 (1)에서 만약 비가시성 환경에서의 i 번째 송신기와 수신기 사이의 신호 전달에서의 비가시성 오류 값 b_i 는 오류 값인 e_i 이다.

III. ToA를 기반으로 하는 측위 방법

이번 장에서는 우리는 ToA를 기반으로 하는 무선 측위 방법의 수학적 모델링을 설명할 것이다. III.1 절에서는 ToA를 기반으로 하는 거리 측정 시스템에 대해 설명하고, III.2 절에서는 비가시성 환경에서의 ToA 기반 측정방법들을 설명할 것이다.

3.1 ToA 기반 거리 측정 시스템

ToA를 기반으로 하는 거리 측정 시스템으로는 단 방향 거리 측정 (OWR: One-way ranging)^[6], 양 방향 거리 측정 (TWR: Two-way ranging)^[7], 그리고 대칭적인 두 면의 양 방향 거리 측정 (SDS-TWR: Symmetric double sided TWR)^{[8], [9]}방법 등이 있다. 그림 2는 이와 같은 두 노드 사이의 거리 측정 방법들을 표현하였다. ToA 기반 거리측정은 두 노드 사이의 거리를 측정하기 위한 전파된 신호의 시간 t_p 를 이용한다.

3.1.1 단 방향 거리 측정 (OWR)

OWR 방법은 거리 측정을 위한 두 노드 사이의 정확한 시간을 요구한다. 그러나 무선 센서 네트워크에

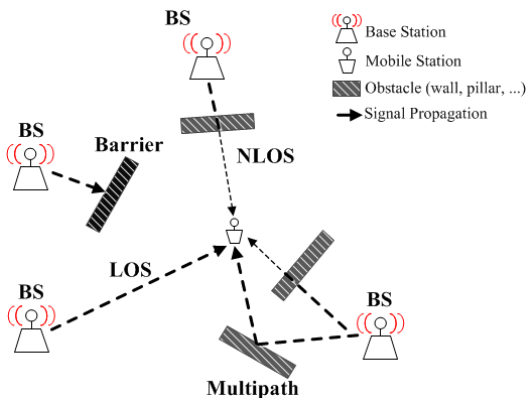


그림 1. 비가시성 환경에서의 무선 신호 전파
Fig. 1. Signal propagation in NLOS Environments

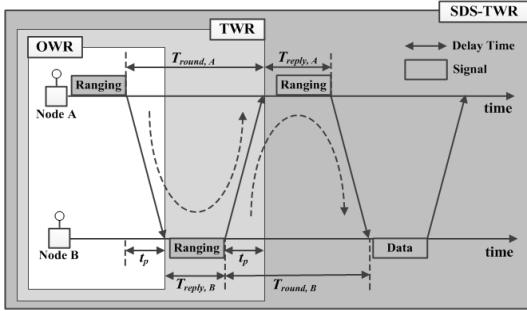


그림 2. ToA 기반 거리 측정 시스템 (OWR, TWR 과 SDS-TWR)
Fig. 2. ToA-based ranging systems (OWR, TWR and SDS-TWR)

서는 거리 측정을 위해 필요한 정확한 시간을 구하기 위한 비용과 복잡도의 증가 때문에 측위 시스템을 설계하는 데는 적합하지 않다. 그림 2에서는 i 번째 노드에서의 신호의 도착시간을 구하기 위한 t_p 가 계산되어 있다.

3.1.2 양 방향 거리 측정 (TWR)

TWR 방법은 거리 측정을 위한 송신기와 수신기 사이의 전달하고 오는 신호를 이용하여 신호의 시간 동기화를 줄이며 거리의 측정이 가능하다. 그림 2에서 이 방법은 식 (2)에서와 같이 표현될 수 있다.

$$t_{p,TWR} = \frac{1}{2}(T_{roun,A} - T_{repy,B}) \quad (2)$$

$T_{roun,A}$ 는 노드 A에서의 한 바퀴 순환하는 시간 이고, $T_{roun,B}$ 는 노드 B에서의 한 바퀴 순환하는 시간이다.

3.1.3. 대칭적인 두 면의 양 방향 거리 측정 (SDS-TWR)

SDS-TWR 방법은 거리 측정 오류의 원인이 되는 오프셋을 제거하기 위해 제시되었다. SDS-TWR을 적절히 이용하기 위해서는 최소 4개의 신호들이 그림 1에서와 같이 $T_{repy,A} = T_{repy,B}$ 라는 가정이 요구된다. 그림 1에서와 같이 표현되기 위해서는 SDS-TWR은 두 번의 순환 시간 ($T_{roun,A}$ 와 $T_{roun,B}$)을 가져야 하고 다음 식 (3)과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} t_{p,1} &= \frac{1}{2}(T_{roun,A} - T_{repy,B}), \\ t_{p,2} &= \frac{1}{2}(T_{roun,B} - T_{repy,A}) \end{aligned} \quad (3)$$

식 (3)에서 $t_{p,1}$ 과 $t_{p,2}$ 는 두 노드 사이의 전달된 신호의 전파 시간을 나타낸다. 그 결과 평균 전파 전달 시간은 다음 식 (4)와 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} t_{p,SDS-TWR} &= \frac{1}{4} \{ (T_{roun,A} - T_{repy,B}) + (T_{roun,B} - T_{repy,A}) \} \end{aligned} \quad (4)$$

무선 센서 네트워크에서 거리 측정 정확도는 백색 가우시안 노이즈 (AWGN: Additive White Gaussian Noise), 다중 통로 환경, 직선 경로 초과 지연 시간, 비가시성 오류, 다중 접근 간섭, 클럭 오프셋과 동일 하지 않는 응답 시간들에 의해 독립적으로 작용하여 영향을 받는다.

3.2 ToA 기반 측위 시스템

ToA를 기반으로 하는 측위 시스템^[10]에서 우리는 설치되어 있는 송신기들의 위치는 알고 있었고 이것을 2차원 (2-D: 2-dimensional)에서 고려하였다. 위치를 알고 있는 i 번째 송신기는 $\mathbf{x}_i = [x_i \ y_i]^T$ 로 표현가능하고 i 번째는 전체 송신기의 수 $i = 1, \dots, N$ 개 이다. 그리고 찾고자 하는 수신기는 위치를 알고 있지 못하기 때문에 $\mathbf{x} = [x \ y]^T$ 로 표현이 가능하다. 예를 들어 비가시성 환경에서는 송신기와 수신기 사이의 ToA 측위는 그림 3과 같이 표현할 수 있다.

i 번째 송신기로부터 ToA 기반 측정 거리 \hat{d}_i 는 빛의 속도 c (3.0×10^8 m/s) 과 ToA 신호와의 곱으로 표현할 수 있고, 다음 식 (5)와 같이 모델링 될 수 있다.

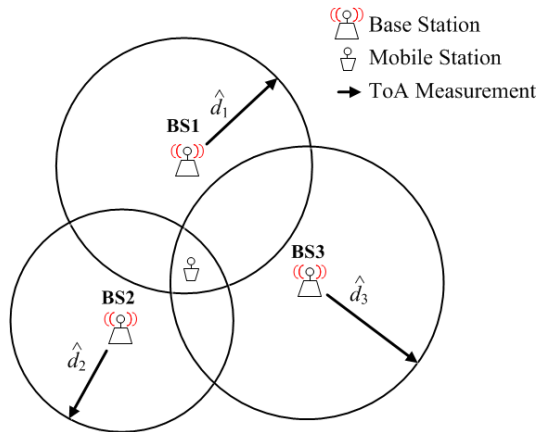


그림 3. 비가시성 환경에서 ToA 기반 측위 시스템
Fig. 3. ToA-based localization in NLOS environments

$$\begin{aligned} \hat{d}_i &= c \times t_i \\ &= d_i + b_i + n_i, \quad i = 1, 2, \dots, N \end{aligned} \quad (5)$$

t_i 는 i 번째 송신기에서의 전달된 신호의 도착 시간이고 ToA 거리 측정 방법은 III.1 절에서 설명하였다. 식 (5)의 측정된 거리 값에서 수신기에 측정된 t_i 는 도착한 신호의 세기가 가장 강한 신호 값을 이용하기 때문에 비가시성 환경에서는 실제 거리 값이 측정되어야 할 초동시각 (first arrival time)을 채택하지 못하고 II장에서 설명한 여러 오차들로 인해 도착하게 신호 중 가장 강한 신호의 도착 시간을 감지하게 되므로 지연된 시간 값을 이용한다. 그래서 측정되는 \hat{d}_i 는 실제 측정되어야 할 거리 값보다 오차 값을 가지는 거리 값으로 측정이 된다. d_i 는 i 번째 송신기와 수신기 사이의 실제 거리이고, b_i 는 비가시성 오류 값을 의미하고 II장에서 설명한 것처럼 0이 아닌 양의 값을 가지는 오류 값이다. $n_i = N(0, \sigma_i^2)$ 을 가진 백색 부가 가우시안 오류 (AWGN)이며, N 은 측위 시스템에서 설치되어져 있는 전체 송신기 수이다. 오류를 가지지 않은 실제 거리 d_i 는 다음 식 (6)과 같은 삼변측량 (trilateration)에 의해 계산이 된다.

$$\begin{aligned} d_i &= \frac{\|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i\|}{\sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2}} \end{aligned} \quad (6)$$

$\|\cdot\|$ 은 i 번째 송신기와 찾고자 하는 수신기와의 거리의 벡터 값을 유클리디언 놈(Euclidean norm)으로 표현을 하였다.

IV. ToA를 기반으로 하는 기존의 무선 측위 방법들

이번 장에서는 우리는 ToA를 기반으로 하는 다양한 무선 측위 방법들을 설명할 것이다. IV.1절에서는 ToA 측위를 위한 삼변측량을 비선형 표현으로써 표현된 거리 방정식을 이용하여 수신기의 위치를 구하는 행렬 해석적인 수학적 모델로써 소개할 것이고, IV.2절에서는 비가시성 오류를 최소화시키는 것으로 잘 알려진 비선형 최소제곱법 (NLS: Non-linear least squares)에 대해 설명하고, NLS를 개선시킨 편중된 최소제곱법 (WLS: Weighted least squares)에 대해서 설명할 것이고, IV.3절에서는 ToA 측위 원들의 교차점을 이용한 무게중심방법에 대해 설명할 것이다.

4.1 ToA를 위한 비선형 모델 행렬 표현

무선 측위에서 수신기의 위치를 수학적으로 풀기 위해서는 우리는 식 (6)에서 이용된 ToA 측위 원들을 비선형 방정식의 형태로 식 (7)에서와 같이 표현하였다.

$$(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 = \hat{d}_i^2, \quad i = 1, \dots, N \quad (7)$$

식 (7)은 가시성 환경에서 노이즈가 없는 송신기와 수신기 사이의 ToA 측위를 나타낸 것이다. 그러나 실제 환경에서는 여러 노이즈들과 비가시성 오차들이 존재하기 때문에 ToA 측위 원의 방정식은 식 (8)에서와 같이 표현이 된다.

$$(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 = \hat{d}_i^2, \quad i = 1, \dots, N \quad (8)$$

우리는 식 (7)에서는 ToA 측위 원들의 교차점을 이용하여 찾고자 하는 수신기의 위치를 계산할 수 있다. 그러므로 찾고자하는 수신기의 위치를 결정하기 위해서는 우리는 비선형 방정식의 형태를 선형의 방정식의 형태로 변환할 수 있다. 송신기와 수신기 사이의 ToA 측위 식들의 연립과 선형화를 통해 우리는 다음 식 (9), (10)와 같이 표현할 수 있다^{[11],[12]}.

$$\mathbf{A}\boldsymbol{\theta} = \frac{1}{2}\mathbf{P} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{A} &= \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & -0.5 \\ x_2 & y_2 & -0.5 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_N & y_N & -0.5 \end{bmatrix}, \\ \boldsymbol{\theta} &= \begin{bmatrix} x \\ y \\ x^2 + y^2 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{P} = \begin{bmatrix} x_1^2 + y_1^2 - \hat{d}_1^2 \\ x_2^2 + y_2^2 - \hat{d}_2^2 \\ \vdots \\ x_N^2 + y_N^2 - \hat{d}_N^2 \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (10)$$

그리고 마지막으로 수신기의 위치가 표현되어 있는 $\boldsymbol{\theta}$ 에서 $\mathbf{x} = [x \ y]^T$ 를 구하기 위해서는 다음 식 (11)과 같이 식 (9)를 행렬의 역행렬을 이용하여 구할 수 있다.

$$\boldsymbol{\theta} = \frac{1}{2}(\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{P} \quad (11)$$

이와 같이 식 (9), (10), (11)을 이용하여 행렬을 푸

는 것을 선형 최소제곱법 (LLS: linear least squares)^[13]라고 부른다. 그러나 비가시성 환경에서 식 (8)을 이용하는 ToA 측위 원들의 교점은 하나의 같은 교점에 만나지 않는다. 그림 4에서 우리는 가시성 환경에서의 ToA 측위 원들을 표현하고 비가시성 환경에서의 ToA 측위 원들을 나타내었다.

비가시성 오류의 존재들로 인하여 비가시성 환경에서는 삼변측량으로 인한 ToA 측위 원들의 한 교차점이 없기 때문에 실제 수신기의 위치를 알 수 없다. 그 결과 비가시성 환경에서는 그림 4.(b)와 같이 ToA 측위 원들의 교차 지역이 생기면서 위치 측정 오류가 발생한다. 그리고 겹쳐지는 영역에서는 실제 수신기의 위치를 찾기는 어렵다.

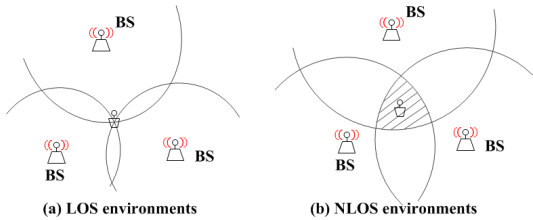


그림 4. ToA 기반 측위 시스템: (a) 가시성 환경, (b) 비가시성 환경
Fig. 4. ToA-based localization: (a) LOS environments, (b) NLOS environments

4.2 비선형 최소제곱법 방법

비선형 최소제곱법 (NLS)^[14]는 송신기와 수신기 간의 오류 값이 최소가 되는 것을 찾아주는 방법으로 식 (12)와 같이 표현할 수 있다.

$$\hat{\mathbf{x}} = \arg \min \left\{ \sum_{i=1}^N (\hat{d}_i - \|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i\|)^2 \right\} \quad (12)$$

비선형 최소제곱법의 목적은 모든 송신기들과 수신기 사이에서 거리의 오차를 최소화 시키는 값들을 추정해서 최종 수신기의 위치라고 표현을 해주는 방법이다.

비선형 최소제곱법을 보완하기 위해 편중된 최소제곱법 (WLS)^[15]가 제안되었고, 약간의 편중 값 β_i 값을 송신기와 수신기 사이의 각각의 측정된 거리 값에 편중을 줘서 최종 수신기의 위치를 추정하는 방법이다. 편중된 최소 제곱법은 식 (13)와 같이 표현할 수 있다.

$$\hat{\mathbf{x}} = \arg \min \left\{ \sum_{i=1}^N \beta_i (\hat{d}_i - \|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i\|)^2 \right\} \quad (13)$$

β_i 는 ToA 측정의 오류의 분산 값을 이용하는데 $\beta_i = \frac{1}{\sigma_i^2}$ 으로 이용한다.

4.3 ToA 측위 원들의 교차점을 이용한 무게중심 방법

ToA 측위 원들의 겹쳐지는 영역에서 발생하는 교차점들의 무게중심을 이용하여 수신기의 최종 위치를 나타는 방법이 있다^[16]. 그림 5는 ToA 측위방법에서 측위 원들의 교차점을 표시한 그림이다. 그림 5는 단순하게 3개의 송신기들과 수신기 사에서의 ToA 측위를 그림으로 표현하였고, ToA 측위 원들이 만나는 교차점을 그림에 표현하였다. 만약 가시성 환경에서는 ToA 측위 원들이 하나의 교차점에서 만나서 정확한 수신기의 위치를 표현할 수 있지만, 비가시성 환경에서는 오류로 인해 겹쳐지는 영역이 생기고 다양한 교차점(A, B, ..., F)들이 생기게 된다. 겹쳐지는 영역 안에서의 수신기의 정확한 위치를 찾는 것은 무척 어렵고 그로인해 교차점의 무게중심을 이용하는 방법^[16]이 제안되었다.

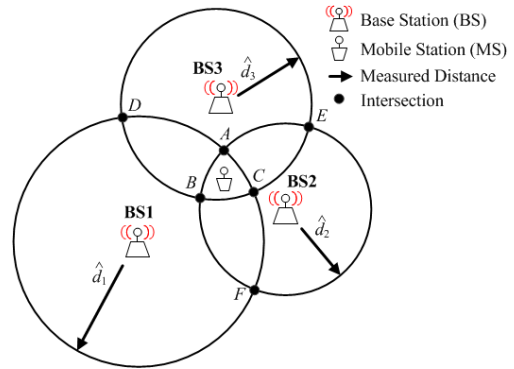


그림 5. 교차점을 가진 ToA 기반 측위 시스템
Fig. 5. ToA-based localization with intersections

V. 다양한 송신기가 설치된 곳에서의 정확도 향상을 위한 측위 알고리즘 제안

이번 장에서는 다양한 송신기가 설치된 무선 센서 네트워크 환경에서 위치 정확도 향상을 위한 측위 알고리즘에 대해 기술한다. 기존 송신기들은 넓은 영역을 커버하고 여러 환경과 곳곳에서 통신이 될 수 있게

많은 송신기들을 통신회사나 빌딩 등에서 설치를 하고 있다. 정확한 측위 시스템을 이용하기 위해서는 송신기와 수신기 간의 비가시성이 존재할 경우 정확성이 무척 낮아진다. 그리고 무선 센서 네트워크 환경에서는 다중 통로 환경과 신호의 간섭으로 인해 무선 채널 환경에서 정확한 통신 시스템을 설계하는 것은 무척 어렵다. 비가시성 환경에서는 무선 장치 간의 정확한 통신을 하며 활용하기에는 많은 오차의 요인들이 존재하기 때문에 실제 측위 시스템을 설계하기 위해서는 많은 어려운 점이 존재하고 있다. 그래서 정확도를 높이기 위한 효율적인 방법들을 이용하여 측위 시스템을 적용하고자 하는 환경에서 효과적으로 이용할 수 있게 알고리즘들을 제안하였다. 제안하는 측위 알고리즘은 기존 2단계의 측위 알고리즘에서 거리 측정을 보완하는 알고리즘을 추가하고 효과적인 송신기 선택 방법을 추가하는 절차로 구성된다. V.1절에서는 ToA 측위에서 거리 측정을 할 때 비가시성의 오류를 받았기 때문에 측정된 거리 값을 보정해주는 알고리즘을 설명할 것이고, V.2절에서는 다양한 송신기가 설치된 무선 센서 네트워크 환경에서 측위의 정확도를 높이기 위해 측위를 위한 효율적인 송신기 선택 방법을 추가하여 측위 시스템의 정확도를 향상시키고자 하였다.

5.1 ToA 측위를 위한 거리 측정 보정 알고리즘

그림 4와 같은 비가시성 환경에서 ToA 측위 시스템을 보면 ToA 측위 원들의 겹쳐지는 영역 안에서 수신기의 위치를 찾는 것은 무척 어렵다. 그래서 비가시성 환경에서 ToA 거리 측정에 대한 비가시성 오류 감소 방법이 제안되었다¹⁷⁾. 실제 실내 환경에서 송신기와 수신기 사이의 ToA 측위로 인해 측정된 거리 값은 장애물들과 같은 비가시성 환경으로 인해 식 (5)에서와 같이 실제 거리 값보다 오차를 가진 값이 된다. 그래서 식 (14)과 같이 보정할 수 있는 편향 값을 측정된 거리 값에 대입하여 측정된 거리 값에 정밀도를 높일 수 있는 비가시성 감소 방법을 제안할 수 있다.

$$\begin{aligned} \tilde{d}_i &= \hat{d}_i - M_i \\ &= d_i + b_i + n_i - M_i, \quad i = 1, 2, \dots, N \end{aligned} \quad (14)$$

여기서 M_i 는 비가시성 오차를 감쇄를 할 수 있는 요소이다. 감쇄가 적용된 ToA 측위 시스템은 기존의 측위 방법에서의 송신기와 수신기 사이의 거리 측정보다 오차가 보정된 거리 측정 값을 가지기 때문에 ToA 측위의 정밀도를 향상시킬 수 있다.

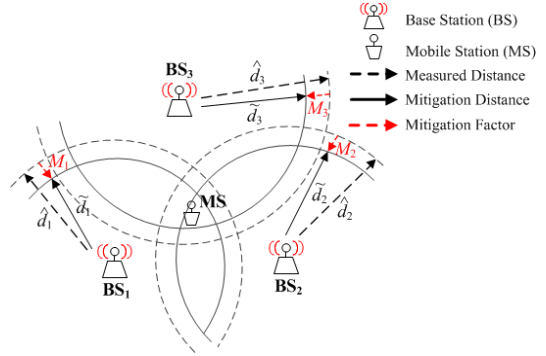


그림 6. 비가시성 오차 감쇄 방법을 가진 ToA 기반 측위 시스템
Fig. 6. ToA-based localization with NLOS mitigation

그림 6은 비가시성 환경에서의 ToA 기반 측위 시스템에서 식 (14)의 감쇄방법이 적용되어 ToA 측위의 오차가 줄어드는 ToA 측위 방법에 대해 그림으로 표현해 놓았다.

일반적으로 무선 센서 네트워크를 하기 위해서는 같은 규격의 통신 장치들을 이용하여 설계한다. 하지만 각각의 하드웨어적인 특성의 오차와 클럭의 차이로 인해 보정할 수 있는 기본적인 통신 작업들이 필요하다. 그래서 비가시성 오차로 인한 측정된 거리를 감소하는 방법이 제안되었고, 위치를 알고 있는 무선 장치들 (송신기) 간의 거리 측정을 통해 실제거리와의 차이를 구한다. 그리고 무선 측위를 위한 전체의 송신기들 간의 차이를 이용하여 보정할 수 있는 편향 값 M_i 를 구할 수 있고 식 (15)에서와 같이 표현하였고, 그림 7에서 같이 송신기들 간의 거리 측정 방법에 대해서 간략히 설명해 놓았다. j 는 하나의 선택된 송신기를 제외한 나머지 송신기들의 수를 의미한다. 식 (15)는 하드웨어적인 특성으로 생기는 오프셋 오차를 줄이기 위해 위치를 알고 있는 송신기들 간의 통신을 이용하여 각각의 신호의 전파가 가시성 환경인지 비가시성 환경인지에 따른 오차 값을 보정해 줄 수 있다. 그래서 한 송신기에서 다른 송신기들 간의 통신을 이용하여 실제거리보다 측정거리에서 생기는 거리의 오차 값을 계산하여 그에 대한 오차 값을 거리 측위에 보정할 수 있도록 하는 거리 측정 보정 알고리즘을 제안하였다. 각각의 송신기 간에서 생기는 하드웨어적인 오프셋에 의한 오차를 보정하기 위해 무선 센서 네트워크 환경에서 설치되어 있는 모든 송신기 간의 통신을 이용하여 거리 측정에 관련된 편향 오차를 평균 값으로 이용하여 전체 무선 측위 시스템에서 발생하는 오차에 대한 적절한 거리 측정의 보정 값을 계산하였다.

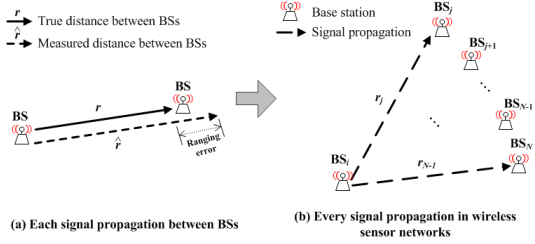


그림 7. 무선 센서 네트워크 환경에서 비가시성 오차 감쇄를 위한 신호 전파
 Fig. 7. Signal propagation for NLOS mitigation between BSs in wireless sensor networks

$$M_i = \frac{\sum_{j=1}^{N-1} (\hat{r}_j - r_j)}{N-1}, \quad j = 1, 2, \dots, N-1 \quad (15)$$

위에서 설명한 방법을 이용하여 비가시성 오차에 대한 편향 값을 구할 수 있고, 실제 ToA 측위를 위한 거리 측정에 대해 보정할 수 있는 거리를 식 (14)에서와 같이 구할 수 있다.

5.2 ToA 측위 정확도 향상을 위한 송신기 선택 알고리즘

실내 무선 측위를 위한 사무실이나 지하 주차장, 지하철 역, 복지 시설 및 마트 등에서는 무선 장치의 통신이 가능한 범위와 다양한 위치에서의 통신 환경을 위해서는 수많은 송신기들이 설치되어 네트워크 환경을 조성한다. 이와 마찬가지로 무선 센서 네트워크 환경에서 ToA 측위 시스템은 최소 3개의 송신기가 설치되어 있어야 하지만 정밀도와 넓은 영역의 범위를 포함하기 위해서는 3개 이상의 송신기들이 설치되어 통신 환경을 이루고 있다. 하지만 송신기와 수신기 간의 무선 채널 환경에서는 가시성 환경과 비가시성 환경이 골고루 존재하고 있으며 서로 통신을 하기에는 무선 채널을 이용하는 다양한 송신기들이 설치되어 있어 신호의 간섭이 존재하며 측위를 위한 통신 시스템을 설계하기에는 정확한 신호를 전파받기에는 정확성이 무척 낮아지고 측위를 위한 송신기에서의 신호를 감지하기에는 효율적인 면에서 성능이 떨어진다. 그래서 이번 절에서는 측위의 정확도를 높이기 위해서 다양한 송신기가 설치된 환경에서 효과적인 송신기 선택 방법 알고리즘을 추가적으로 제안하였다^[18].

5.2.1 ToA 측위 원 안에서의 겹쳐지는 영역 계산

그림 4에서 비가시성 환경에서 보면 송신기와 수신기 사이의 ToA 측위를 하게 되면 겹쳐지는 영역이 생

기게 된다. 두 개 또는 그 이상의 원들에서는 위치를 알고 있는 송신기들 사이의 거리 값보다 ToA 원에서 생기는 반지름 값들의 합이 더 큰 값을 가지면 그림 5에서와 같이 교점이 발생하게 된다. 이런 교점들은 측정된 거리 값들과 송신기들의 위치 정보 값을 알고 있으면 삼각함수식을 이용하여 구할 수 있다. 그림 8에서와 같이 실제 겹쳐지는 영역은 겹쳐지는 원 사이의 도형이기 때문에 영역을 구할 수는 없다. III.2 절에서 표현한 것처럼 송신기들의 위치 값 $\mathbf{x}_i = [x_i \ y_i]^T$ 와 수신기의 위치 값 $\mathbf{x} = [x \ y]^T$, 그리고 송신기와 수신기들 사이의 측정된 거리 값 \hat{d}_i 을 이용하여 다음 식 (16), (17), (18)을 이용하면 ToA 측위 원들의 교점 값 $\tilde{\mathbf{x}} = [\tilde{x} \ \tilde{y}]^T$ 을 구할 수 있다^[19].

$$\begin{aligned} \tilde{x} &= x_1 + \hat{d}_1 \cos \theta, & \tilde{y} &= y_1 + \hat{d}_1 \sin \theta \\ & \text{or} & & \\ \tilde{x} &= x_2 + \hat{d}_2 \cos \theta, & \tilde{y} &= y_2 + \hat{d}_2 \sin \theta \end{aligned} \quad (16)$$

여기서 θ 는 식 (17), (18)을 이용하면 구할 수 있다.

$$\theta = \arctan \frac{Y}{X} \pm \arctan \left(\frac{\hat{d}_1^2 - \hat{d}_2^2 + D^2}{2\hat{d}_1 D} \right) \quad (17)$$

$$D = \sqrt{X^2 + Y^2}, \quad X = x_2 - x_1, \quad Y = y_2 - y_1 \quad (18)$$

그림 8에서와 같이 보면 실제 겹쳐지는 영역은 정확히 구할 수 없기 때문에 근사의 형태인 삼각형의 넓이로 구하여 위에서 구한 교점들을 이용하면 ToA 측

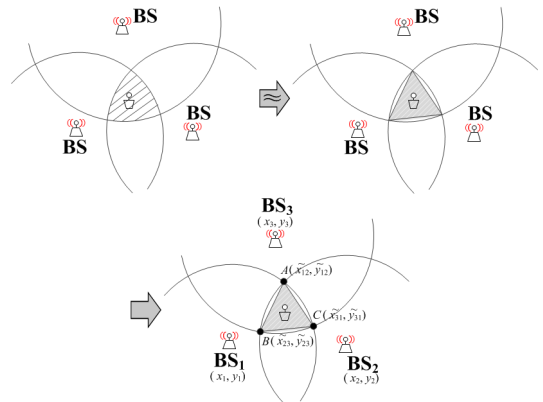


그림 8. ToA 측위 원들 사이에서 실제 겹쳐지는 영역과 근사 삼각형 영역과의 관계도
 Fig. 8. Assumed relationship between the true overlapping area and the triangular region

위에서 3개의 송신기로 인해 겹쳐지는 영역의 근사 영역의 넓이 값을 구할 수 있다. 겹쳐지는 영역의 벡터의 곱 (외적)을 이용하면 식 (19)에서와 같이 구할 수 있다.

$$S = \frac{1}{2} |(B-A) \times (C-A)| \quad (19)$$

식 (19)에서 $A = [\tilde{x}_{12} \ \tilde{y}_{12}]^T$, $B = [\tilde{x}_{23} \ \tilde{y}_{23}]^T$, $C = [\tilde{x}_{31} \ \tilde{y}_{31}]^T$ 이고 좌표 \tilde{x} , \tilde{y} 의 아래 첨자는 송신기 i 번 째 사이의 비교 값들을 의미한다.

5.2.2 겹쳐지는 영역을 이용한 송신기 선택 알고리즘

ToA 측위 시스템은 기본적으로 3개의 송신기 사이에서 무선 측위가 가능하다. 하지만 여러 환경적인 이유로 인해 수많은 송신기를 설치하여 무선 측위를 하고 있다. 각각의 송신기와 수신기 사이는 가시성 환경인지 비가시성 환경인지는 알 수 없기 때문에 무선 측위의 정확도는 낮아질 수 밖에 없다. 그러므로 위 V.2.가 장에서 설명한 겹쳐지는 영역 계산을 이용하면 효율적이고 효과적인 무선 측위가 가능하다. ToA 측위에서는 비가시성 환경의 오차가 클수록 송신기와 수신기 사이의 측정된 거리 값은 실제 거리 값보다 더 크게 측정이 되는 데, 이것은 실제 3개의 ToA 측위 시스템에서는 겹쳐지는 영역이 더 커지는 환경이 조성된다. 그러므로 겹쳐지는 영역이 가장 작은 3개의 송신기를 선택해서 기존의 무선 측위 방법들을 적용하면 실제 무선 측위 시스템의 정확도는 향상될 것이다. 즉 식 (19)에서 표현한 삼각형의 영역 S 가 0의 값에 가장 작은 3개의 송신기를 선택하는 방법을 실제 환경에서 이용한다면 무선 측위의 정확도는 향상될 것이다. 그러므로 송신기 선택 알고리즘을 적용하기 위해서는 모든 송신기에서 3개의 송신기들을 선택하여 뽑는 조합의 경우의 수 만큼의 계산 $k (= {}_N C_3)$ 이 필요하다. 다음 과정에서 3개의 뽑혀진 송신기들의 겹쳐지는 영역의 근사 값인 삼각형의 영역을 식 (19)를 이용하여 계산하는 과정이 필요하고 이것은 $S(k)$ 라 표현할 수 있다. 그리고 이것의 최소화를 뽑는 과정은 식 (20)에서와 같이 표현할 수 있다.

$$\operatorname{argmin}_k S(k) \quad (20)$$

이번 V장에서 제안하는 다양한 송신기가 설치된

곳에서의 정확도 향상을 위한 측위 알고리즘에 대한 절차는 기존 2단계의 측위 알고리즘 (거리측정, 측위) 단계에서 그림 9에서와 설명한 것과 같이 거리 측정을 보완하는 알고리즘과 송신기 선택 알고리즘을 추가하여 정확도를 높일 수 있다.

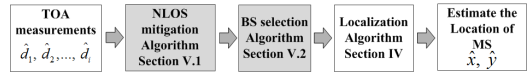


그림 9. 제안하는 위치 측위 절차
Fig. 9. Proposed localization process

VI. 제안하는 알고리즘의 성능평가를 위한 시뮬레이션 결과

이번 장에서는 제안하는 방법들의 성능을 증명하기 위해 우리는 위치인식표준에 해당하는 2.4Ghz 대역에서 이용하는 칩 신호(CSS: Chirp spread spectrum)^[20,21]를 이용하여 측위 시스템^[22]을 설계하였다. 측위 시스템의 실험은 다중통로환경과 비가시성 환경이 있는 실제 실내 환경에서 측정된 거리 데이터 값을 이용하여 수행하였고, 6개의 송신기를 설치하여 위치를 알고 있으며 1개의 수신기를 찾고자하였다. 사용한 ToA 측위 알고리즘에 대한 설명은 IV장에서 설명한 알고리즘을 적용하여 기존의 위치 측위 방법과 그림 9에서 제안한 방법을 적용한 측위 절차와의 비교를 하였다.

첫 번째 실험은 그림 10에서와 같은 간섭환경과 다중통로 환경이 존재하는 36 × 22m의 실내 농구장 환경이다. 실내 농구장 환경은 기지국에서 설치한 송신기와 Wi-Fi 망으로 인한 2.4Ghz 대역을 이용하기 때문에 신호의 간섭환경이 발생할 수 있고, 벽면과 기둥 등으로 인해 신호가 반사되어 전달되는 다중통로 환경이 조성되어 있는 환경이다. 무선 측위 실험을 위해 송신기 6개의 설치 위치는 좌표 상으로 [1.5, 1.1]^T, [1.5, 20.5]^T, [34.7, 20.5]^T, [34.7, 1.1]^T, [19.1, 1.1]^T, [19.1, 20.5]^T의 위치에서 1.7m의 높이를 갖도록 설치하였다. 그리고 찾고자 하는 수신기의 위치는 [7.9,

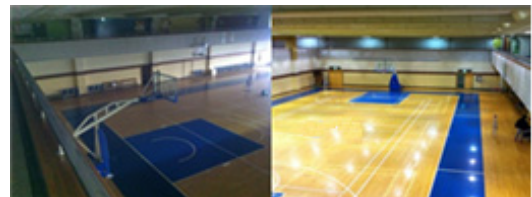


그림 10. 실험환경 1: 실내 농구장
Fig. 10. Experimental environment 1: Indoor basketball gymnasium

6]^T, [19.1, 10.5]^T, [27.8, 15]^T의 위치에서 1m의 높이를 갖도록 하며 위치를 변경해 가며 측위 실험을 하였다. 위치 추정 오차를 비교하기 위해 IV장에서 설명한 측위 알고리즘들을 적용하였고, 송신기와 수신기의 다른 높이는 피타고라스의 정리를 이용하여 계산을 하였다. 표 1은 기존의 위치 측위 방법들과 제안한 방법을 이용하여 비교한 위치 추정을 하였고 그에 대해 같은 위치에서 100번 실험을 한 후 오차에 대한 평균값을 표 1에 비교하였다. 측위의 오차는 식 (21)에서와 같이 표현이 가능하다.

$$\text{Estimation Error} = |x - \hat{x}| \quad (21)$$

두 번째 실험은 그림 11에서와 같은 철골 구조와 자동차, 벽 등의 비가시성 환경이 큰 110 × 55m의 지하 주차장 환경이다. 지하 주차장 환경은 신호의 전파에 큰 영향을 주는 철과 벽 등이 많이 존재하는 환경으로, 송신기와 수신기 사이의 신호가 전달되는데 큰 어려움이 있어 정확하게 수신된 신호의 시간을 감

지하기 어렵다. 그리고 통신회사에서 설치한 여러 송신기들로 인해 2.4Ghz 대역에서 이용하는 무선 신호의 간섭이 발생할 수 있다. 무선 측위 실험을 위해 설치한 송신기 6개의 위치는 좌표 상으로 [10.52, 11.5]^T, [10.52, 34.6]^T, [90.04, 34.6]^T, [90.04, 11.5]^T, [56.98, 11.5]^T, [56.98, 34.6]^T의 위치에서 1.7m의 높이를 갖도록 설치하였다. 그리고 찾고자 하는 수신기의 위치는 [30.2, 19.7]^T, [56.2, 19.7]^T, [72.8, 19.7]^T의 위치에서 1m의 높이를 갖도록 하며 위치를 변경해 가며 측위 실험을 하였다. 표 2는 기존의 위치 측위 방법들과 제안한 방법을 이용하여 비교한 위치 추정을 하였고 그에 대해 같은 위치에서 100번 실험을 한 후 오차에 대한 평균값을 표 2에 비교하였다.

위와 같이 제안한 측위 시스템과 기존의 방법들에서 추정 오차의 실험 결과를 보면 더욱 정밀도가 향상된 것을 확인할 수 있다. 이것은 제안한 거리 측정 알고리즘이 기존의 방법들에서 발생하는 측정 거리 값의 오차 값을 줄여줬기 때문에 무선 측위를 하는데 더욱 정밀도를 높였을 뿐더러, 송신기 선택 알고리즘을 이용하여 다수의 송신기들이 존재하는 무선 센서 네트워크 환경에서 가시성과 비가시성 환경에서 더욱 효율적으로 오차가 적은 송신기를 선택하여 무선 측위 시스템에 적용을 하였고, 그로 인해 위치 추정 값들이 줄어 든 것을 확인하였다. 실험 결과는 실제 비가시성과 무선 채널의 간섭의 영향을 많이 받는 환경에서 측위 시스템을 설계하여 적용하여 다른 환경에서도 제안하는 방법이 적용 가능하다는 것을 확인하였다.

표 1. 실내 체육관에서 기존의 방법과 제안하는 방법 사이의 추정 오차의 비교
Table 1. Comparison of estimation error between conventional method and proposed method in indoor gymnasium

Localization	Method	Location 1	Location 2	Location 3
		(7.9, 6)	(19.1, 10.5)	(27.8, 15.0)
NLS	[14]	7.5517 m	15.3523 m	8.0504 m.
	Proposed Method	3.0365 m	2.0562 m	1.4532 m
WLS	[15]	2.4836 m	3.8622 m	4.1529 m
	Proposed Method	1.3498 m	2.3314 m	0.8132 m
Center of Gravity	[16]	2.1060 m	2.0310 m	2.1662 m
	Proposed Method	1.2532 m	1.5352 m	1.6327 m



그림 11. 실험환경 2: 지하 주차장
Fig. 11. Experimental environment 2: Parking Lot

표 2. 지하 주차장에서 기존의 방법과 제안하는 방법 사이의 추정 오차의 비교
Table 2. Comparison of estimation error between conventional method and proposed method in parking lot

Localization	Method	Location 1	Location 2	Location 3
		(30.2, 19.7)	(56.2, 19.7)	(72.8, 19.7)
NLS	[14]	5.6684 m	6.3843 m	7.7209 m.
	Proposed Method	2.2085 m	3.0142 m	5.3243 m
WLS	[15]	3.5360 m	8.4323 m	6.8167 m
	Proposed Method	2.2143 m	4.8521 m	5.5241 m
Center of Gravity	[16]	4.3257 m	2.7422 m	4.9401 m
	Proposed Method	3.0274 m	2.0270 m	3.0287 m

Ⅶ. 결 론

스마트폰의 도입으로 무선 네트워크 망을 이용한 다양한 통신 응용분야가 무척 관심이 많아지고 있다. 무선 센서 네트워크 환경에서 이용할 수 있는 무선 측위 기술은 상당히 많은 분야에서 적용이 가능하기에 관심이 많아지고 있고 연구가 매우 활발히 진행되고 있다. 하지만 GPS가 도달하지 않는 실내 환경에서는 비가시성 오차로 인해 정확도가 무척 떨어지고 정확성을 높이고자 수많은 방법들이 연구되어 오고 있다. 미래에서 지향하는 유비쿼터스 시대에 더욱 도달하기 위해서는 위치를 기반으로 하는 서비스를 제공하여 다양한 분야에 접목하고 이용하고자 하며 연구들을 진행해오고 있다. 이 논문에서 제안한 방법은 기존의 거리측정과 위치 측위 방법에 대해 연구하고 정확도를 높이고자 하는 방향이 아니라 다른 추가적인 방법들을 추정 알고리즘을 이용하여 절차를 더 자세히 함으로써 정확도를 높이고자 제안하였다. 위치 측위를 하려고 할 때 알고 있는 송신기의 위치를 최대한 이용하여 위치 측위의 정확도를 향상시키고 간단한 여러 방법들을 이용하여 성능을 높이고자 하였다. 그래서 본 논문에서는 위치 인식 시스템의 표준에 해당하는 무선 신호인 침 신호를 이용하여 설계한 측위 시스템을 실제 실내 환경에서 적용하여 실제 환경에서도 적용이 가능하다는 것을 증명하였다. 비가시성 오차가 큰 지하주차장 환경에서 정밀도를 높이면서 실내 측위 시스템이 적용되고자 하는 환경에서도 적용이 가능하다는 것을 입증하였다. 본 논문에서 제안한 측위 방법은 기존의 측위 시스템의 절차에서 정확도를 높이기 위해 제안된 거리 측정을 보완하는 방법과 효율적인 송신기 선택 방법은 앞으로의 측위 시스템을 설계하는데 더욱 정밀하게 추정할 수 있도록 하였다.

References

- [1] J. Y. Lee and D. M. Lee, "Indoor localization algorithm using smartphone sensors and probability of normal distribution in Wi-Fi environment," *J. KICS*, vol. 40, no. 9, pp. 1856-1864, Sept. 2015.
- [2] M. S. Lee, J. W. Kim, and S. S. Lee, "Pedestrian positioning method using multi-level transmission signal strength," *J. KICS*, vol. 40, no. 1, pp. 124-131, Jan. 2015.
- [3] A. Küpper, *Location-based services: Fundamentals and operation*, Wiley, New York, 2005.
- [4] Y. T. Chan, W. Y. Tsui, H. C. So, and P. C. Ching, "Time-of-arrival based localization under NLOS conditions," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 55, no. 1, pp. 17-24, Jan. 2006.
- [5] H. J. Ahn, T. V. Thuy, and Y. H. Lee, "Bluetooth beacon planing considering position estimation accuracy in small and isolated in-door environment," *J. KICS*, vol. 40, no. 7, pp. 1307-1312, Jul. 2015.
- [6] H. S. Ahn, H. Hur, and W. S. Choi, "One-way ranging technique for CSS-based indoor localization," *6th IEEE Int. Conf. Ind. Informat., 2008 (INDIN 2008)*, pp. 1513-1518, Jul. 2008.
- [7] H. Kim, "Double-sided two-way ranging algorithm to reduce ranging time," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 13, no. 7, pp. 486-488, Jul. 2009.
- [8] L. J. King, L. Zhiwei, and F. C. P. Shin, "Symmetric double side two way ranging with unequal reply time," *IEEE 66th Veh. Technol. Conf. 2007 (VTC-2007)*, pp. 1980-1983, Sept. 2007.
- [9] D. G. Oh, S. R. Go, and J. W. Chong, "Packet-reduced ranging method with superresolution TOA estimation algorithm for chirp-based RTLS," *ETRI J.*, vol. 35, no. 3, pp. 361-370, Jun. 2013.
- [10] I. Guvenc and C. C. Chong, "A survey on TOA based wireless localization and NLOS mitigation techniques," *IEEE Commun. Surveys & Tuts.*, vol. 11, no. 3, pp. 107-124, 3rd Quarter, 2009.
- [11] K. W. Cheung, H. C. So, W. K. Ma, and Y. T. Chan, "Least squares algorithms for time-of-arrival based mobile location," *IEEE Trans. Sig. Proc.*, vol. 52, no. 4, pp. 1121-1130, Apr. 2004.
- [12] Y. T. Chan, H. Y. C. Hang, and P. C. Ching, "Exact and approximate maximum likelihood localization algorithms," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 55, no. 1, pp. 10-16, Jan. 2006.
- [13] I. Guvenc, C. C. Chong, and F. Watanabe,

“Analysis of a linear least-squares localization technique in LOS and NLOS environments,” *IEEE 65th Veh. Technol. Conf. 2007*, pp. 1886-1890, Apr. 2007.

- [14] J. J. Caffery and G. L. Stuber, “Overview of radiolocation in CDMA cellular systems,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 36, no. 4, pp. 38-45, Apr. 1998.
- [15] B. T. Sieskul, F. Zheng, and T. Kaiser, “Time-of-arrival estimation in path attenuation,” *IEEE 10th Workshop on Sig. Proc. Advances in Wirel. Commun., 2009*, pp. 573-577, Jun. 2009.
- [16] C. H. Chen, K. T. Feng, C. L. Chen, and P. H. Tseng, “Wireless location estimation with the assistance of virtual base stations,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 58, no. 1, pp. 93-106, Jan. 2009.
- [17] S. R. Go, S. D. Kim, and J. W. Chong, “An efficient non line of sight error mitigation method for TOA measurement in indoor environments,” in *Proc. Int. Conf. Ubiquitous Inform. Manag. Commun.*, no. 72, Jan. 2014.
- [18] S. R. Go and J. W. Chong, “An efficient TOA-Based localization scheme based on BS selection in wireless sensor networks,” *IEICE Trans. Commun.*, E97-B, no. 11, pp. 2560-2569, Nov. 2014.
- [19] B. H. Lee, H. Hur, and H. S. Ahn, “Environmental-adaptive bias calibration in wireless localization,” *IEEE Commun. Lett.*, vol. 17, no. 4, pp. 717-720, Apr. 2013.
- [20] IEEE Standard 802.15.4a-2007, pp. 1-203, Aug. 2007.
- [21] ISO/IEC Standard 24730-5, pp. 1-72, Mar. 2010.
- [22] D. G. Oh, M. K. Kwak, and J. W. Chong, “A subspace-based two-way ranging system using a chirp spread spectrum modem, robust to frequency offset,” *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 11, no. 4, pp. 1478-1487, Apr. 2012.

고 승 열 (Seungryeol Go)



2011년 2월 : 한양대학교 (서울)
미디어통신공학과 졸업
2015년 8월 : 한양대학교 (서울)
전자컴퓨터통신공학과 석박
사 통합과정 졸업
2015년 9월~현재 : 국방과학연
구소 연구원

<관심분야> 통신공학, 추정이론, 측위시스템