

초음파와 RF를 이용한 실내 측위 시스템

조백두*, 권성오°, 천성은*

Indoor Positioning System Using Ultrasonic and RF

Back-doo Cho*, Sungoh Kwon°, Seong-eun Cheon*

요약

본 논문은 실내에서 위치를 측정하기 위해 초음파와 RF 기반의 실내 측위 시스템을 제안한다. 기존의 실내 측위 방안은 시간 동기화, 시스템의 복잡도, 측위의 정확성 등의 문제가 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 초음파와 무선주파수(RF)를 이용한 송수신 시스템을 제안한다. 송신시스템은 한 쌍의 초음파 송신기와 RF 송신기로 구성하고, 수신시스템은 복수의 초음파 수신기들과 하나의 RF 수신기로 구성한다. 또한, 제안된 시스템이 가질 수 있는 성능의 한계를 수학적으로 분석하였다. 제안된 시스템은 시뮬레이션뿐만 아니라 아두이노 모듈을 이용하여 실제 시스템을 제작하여 측위 성능을 평가하였다. 실내 공간 2m×2m×2m에서 25개 지점의 위치를 측정할 결과, 평균 6.1cm, 표준편차 1.6cm의 성능을 보였다.

Key Words : Indoor Positioning System, Localization, Ultrasonic, Radio Frequency, Implementation

ABSTRACT

In this paper, we propose a ultrasonic and RF-based indoor localization system. In previous work, various systems were proposed for indoor localization, but they have limitation in applicability due to time-synchronization, complexity, or accuracy. To overcome such problems, an indoor localization system with ultrasonic and RF is proposed. A transmitting system is composed of a pair of ultrasonic and RF transmitters and the receiving system is composed of multiple ultrasonic receivers and one RF receiver. The theoretical performance limitation is also analyzed. To verify localization performance, we have implemented a receiving systems and a transmitting system using Arduino modules. Experiments were performed in 2m×2m×2m space and the localization errors had a mean of 6.1cm and a standard deviation of 1.6cm.

I. 서론

최근 실내 공간이 대형화되고 복합공간들이 조성됨에 따라 다양한 위치기반 서비스가 개발되고 있다^[1]. 이와 더불어 과거 실외 공간에서 주로 다루어졌던 측위 기술이 실내나 제한된 공간에서도 필요하게 되었다^[2]. 실내 측위 기술이란 실내 공간에서 대상의 위치

를 측정하는 기술을 말한다. 실내 측위 기술은 건물 내 소형 공간을 구분하는 정도의 기술을 시작으로, 궁극적으로는 실내에 배치된 각종 사물의 정확한 위치 정보를 획득하는 기술 구현을 목표로 한다. 현재 실내 측위 기술은 실내 내비게이션, 소셜 네트워크 서비스 등의 민간분야 이외에도 물류, 스포츠, 의료, 긴급구조 등 다양한 산업 분야에 적용되어 연구가 진행되고 있다.

* 이 논문은 2016년 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단 기초연구사업의 지원을 받아 수행되었습니다. (NRF-2015R1A1A1A05001069)

♦ First Author : School of Electrical Engineering, University of Ulsan, topic82@gmail.com, 학생회원

° Corresponding Author : School of Electrical Engineering, University of Ulsan, sungoh@ulsan.ac.kr, 중신회원

* (주)스페이스코드, cse.dreamer@gmail.com, 정회원

논문번호 : KICS2016-10-292, Received October 6, 2016; Revised January 16, 2017; Accepted January 24, 2017

측위 기술은 가용 서비스 영역에 따라 실외 측위 기술과 실내 측위 기술로 분류된다. 대표적인 실외 측위 기술에는 GPS(Global Positioning System)^[3], Cell 기반 측위 시스템^[4] 등이 있다. GPS는 복수의 인공위성에서 발신하는 마이크로파를 수신하여 위치를 결정하는 시스템이다. GPS 위치 측정은 광범위한 지역을 대상으로 3~5m의 오차 범위를 가진다^[5]. GPS의 위치정보는 군용, 항해용 항법서비스, 차량용 연속 측위와 같이 다방면에서 활용되지만, 실내에서는 GPS 신호 수신이 불가능하기 때문에 주로 실외에서만 사용되어 왔다. Cell 기반 측위 시스템은 기지국과 단말기 간의 무선통신 신호를 이용하여 거리를 측정하고, 삼각측정법으로 위치를 추정하는 시스템이다. 스마트폰이 대중화되면서 실외에서는 이미 무선통신 기반의 측위 서비스가 제공되고 있다. 하지만 다중경로(Multipath) 등의 전파환경에 의해 수 m의 거리 오차가 발생하여 실내에 적용하기 어렵다는 단점이 있다. 이러한 한계 및 단점을 극복하기 위해 실내 공간에서 적용 가능한 새로운 방식의 측위 기술이 요구되었다.

실내 공간을 대상으로 위치를 측정하기 위해서 WLAN(Wireless Local Area Network)^[6], UWB(Ultra Wide Band)^[7], 적외선^[8], 초음파^[9] 등의 다양한 실내 측위 기술이 제안되었다^[10-12]. 이들 기술은 실내 공간의 특징, 측위 인프라 구축의 난이도 등에 따라 측위 가능 범위와 측위 정확도에서 여러 차이를 보인다^[13]. WLAN은 무선주파수(RF : Radio Frequency)의 신호의 신호 세기를 측정하여 신호 감쇠에 따른 신호 전달 거리를 계산하는 방식이다. 신호 세기를 이용하여 위치를 추정하기 때문에 장애물에 의한 신호 차단에서 자유롭지만, 환경에 따라 신호 세기가 불안정하여 수 m 단위의 낮은 측위 정확도를 가진다. UWB는 단거리에서 저전력, 대용량 데이터 전송을 위해 매우 넓은 주파수 대역에 걸쳐 신호를 전송하는 방식이다. UWB는 WLAN과 마찬가지로 무선주파수를 이용하여 위치를 추정하는 기술로서 신호의 왕복 시간을 측정하여 거리를 계산한다. UWB의 주파수 특징을 이용하면 WLAN보다 상대적으로 정확한 위치 측정이 가능하지만 매우 정밀한 위치 측정은 어렵고, 반사된 신호의 비행시간만큼 측위 시간이 지연된다. 적외선 기반 측위 기술은 실내 곳곳에 설치된 적외선 센서를 이용하여 위치를 추정하는 방식이다. 수신한 신호의 각도 정보를 기반으로 최대 수 cm 단위의 위치측정이 가능하지만, 고정된 적외선 센서의 위치정보를 획득하는 과정에서 측위 오차가 누적될 수 있으며, 직사광선 등의 환경 요인에 의해 신호의 성능이 저하되는 경우

가 있다. 초음파 기반 측위 기술은 전파속도가 빠른 RF 신호와 상대적으로 전파속도가 느린 초음파 신호 간의 속도차이를 이용하여 위치를 추정하는 방식이다. 초음파 기반 측위 기술은 다른 측위 기술에 비해 수 cm 단위의 높은 측위 정확도 구현이 가능하기 때문에 정밀한 측위에 가장 적합한 기술이다. 하지만 적외선 기반 측위 기술과 마찬가지로 고정된 초음파 센서의 위치정보를 알아야 하고, 송수신기 간의 시간 동기화를 위해 추가적인 센서가 필요하다.

본 논문은 기존의 초음파 기반 측위 기술에서 시간 동기화를 위한 센서의 개수 문제를 개선하고, 고정된 센서의 위치정보에 의한 누적 오차를 최소화하는 측위 시스템을 제안한다. 기존의 초음파 기반 측위 기술은 초음파 신호의 공기 중 전파속도에 근거하여 거리를 측정하기 때문에 초음파 신호와 RF 신호의 시간 동기화가 필수적이다. 초음파 기반 측위 기술에서 송수신기 간의 시간 동기화를 위해서는 초음파 센서의 개수에 대응하여 RF 센서가 필요하고, 이는 시스템의 복잡도를 높이는 근본 원인이 된다. 또한, 기존의 초음파 기반 측위 기술은 사전에 알고 있는 고정된 초음파 센서의 위치를 바탕으로 위치를 추정한다. 하지만 고정된 초음파 센서의 위치를 측정하는 과정에서 누적된 측위 오차는 측위 시스템의 정확도를 낮추게 된다. 본 논문은 RF 신호의 전파속도가 매우 빠르다는 점을 이용하여 초음파 기반 측위 시스템에 필요한 RF 센서의 개수를 1개로 최소화함으로써 시스템 복잡도를 최소화시키는 방안을 제안하였다. 또한, 1개의 RF 센서를 중심으로 위치측정 정확도를 최대화할 수 있는 초음파 수신기 배치를 통해, 기존의 초음파 기반 측위 시스템에 비해 누적되는 측위 오차를 최소화시키는 방안을 제안하였다.

II장에서는 기존의 실내 측위 시스템의 일반적인 모델을 정의하고, 위치측정에 필요한 여러 가지 기술들에 대해 간략히 설명한다. III장에서는 초음파 기반 측위 시스템에서 RF 센서의 개수를 최소화한 방안을 제안하고 이와 함께 고려해볼 만한 문제들에 대해 기술한다. IV장에서는 제안 방안을 바탕으로 수행한 시뮬레이션 및 실험에 대한 설명과 실험 결과에 대한 분석을 논한다. V장에서는 실험 결과를 바탕으로 제안 방안에 대한 결론을 내린다.

II. 실내 측위 시스템

실내 측위 시스템은 크게 신호의 특징을 이용하여 거리를 측정하는 기술과 측정된 거리 정보를 바탕으

로 위치를 추정하는 기술로 구성된다. 본 장에서는 기존 실내 측위 시스템의 일반적인 시스템 모델을 정의하고, 위치추정에 보편적으로 사용되는 기술들에 대해 간략히 설명한다.

2.1 시스템 모델

위치 측정은 $L \times W \times H$ m^3 크기로 정의되는 직육면체 공간 S 에서 이루어진다. S 는 측위 시스템을 포함하고 신호의 전파 경로를 차단하는 장애물이 존재하지 않는 환경을 고려한다. 측위 시스템은 단일 송신기가 복수의 수신기를 향해 신호를 발신하는 능동 방식과 복수의 송신기가 단일 수신기를 향해 신호를 발신하는 수동 방식이 있다^[14]. 본 논문에서는 능동 방식을 고려한다. N 개의 수신기는 S 의 내부에 그림 1과 같이 임의로 배치되며 고정된 위치를 갖는다.

i 번째 수신기의 위치를 $X_i = [x_i, y_i, z_i]^T$, 송신기의 위치를 $X = [x, y, z]^T$ 와 같이 정의한다. X_i 와 X 사이의 거리 d_i 는 다음 식 (1)과 같다. $\| \cdot \|$ 는 벡터의 크기(Norm)를 나타낸다.

$$d_i = \| X_i - X \| \tag{1}$$

d_i 는 TOA(Time of Arrival)^[15], TDOA(Time Difference of Arrival)^[16], AOA(Angle of Arrival)^[17] 등의 다양한 거리 측정 기법들을 이용하여 구할 수 있다. 이 중 초음파 기반 측위 시스템에 주로 사용되는 기술은 TOA 기법이다. 본 논문에서는 TOA 기법을 이용하였으며 이에 대한 설명은 2.2절에서 다룬다.

거리 측정 기법을 이용하여 측정된 거리 d_i 와 이미 알고 있는 고정 좌표 X_i 의 정보를 바탕으로 다음 식

(2)를 세울 수 있다.

$$\begin{cases} (x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 + (z-z_1)^2 = d_1^2 \\ (x-x_2)^2 + (y-y_2)^2 + (z-z_2)^2 = d_2^2 \\ \vdots \\ (x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z-z_i)^2 = d_i^2 \end{cases} \tag{2}$$

식 (2)을 연립하여 해를 구하면 송신기의 좌표를 얻을 수 있다. 이와 같은 연립 방정식의 해를 구하는 방법은 2.3절에서 설명한다.

2.2 TOA 거리 측정 기법

TOA 기법은 신호의 전파속도와 비행시간을 바탕으로 거리를 계산하는 방법이다. 주로 전파속도가 서로 다른 두 신호의 수신된 시간 차이를 이용하여 거리를 측정한다. 신호의 비행시간을 측정하기 위해서 두 신호 중 전파속도가 더 빠른 신호가 송수신기 간의 시간 동기화 역할을 한다. 두 신호의 전파속도를 v_1, v_2 라고 하고 송수신기 사이의 거리를 d 라고 할 때, 신호의 비행시간 Δt 는 다음 식 (3)과 같다.

$$\Delta t = \frac{d}{v_1} - \frac{d}{v_2} \tag{3}$$

수신기에서는 두 신호가 수신된 시간 차이를 측정하여 신호의 비행시간을 알아내고, 두 신호의 전파속도에 근거하여 다음 식 (4)와 같이 송수신기 사이의 거리를 계산한다.

$$d = \frac{v_1 v_2}{v_2 - v_1} \cdot \Delta t \tag{4}$$

2.3 위치 추정 기술

위치 추정 기술에는 선형적 접근법^[18]과 비선형적 접근법^[19]이 있다. 선형적 접근법은 주어진 연립 방정식을 선형화시킨 후에 선형 최소제곱법으로 해를 근사적으로 구하는 방식이다. 선형화를 위해 식 (2)를 다음 식(5)와 같이 재조합한다.

$$\begin{aligned} (x-x_j)(x-x_j) + (y-y_j)(y-y_j) + (z-z_j)(z-z_j) \\ = \frac{1}{2}(d_j^2 - d_i^2 + d_{ij}^2) = b_{ij} \end{aligned} \tag{5}$$

d_{ij} 는 i 번째 고정 좌표와 j 번째 고정 좌표 사이의 거리를 의미한다. 식 (5)를 이용하면 식 (2)은 다음 식 (6)과 같이 선형화될 수 있다.

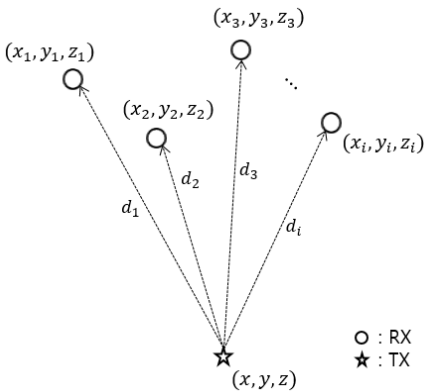


그림 1. 시스템 모델
Fig. 1. System model

$$A = \begin{pmatrix} x_2 - x_1 & y_2 - y_1 & z_2 - z_1 \\ x_3 - x_1 & y_3 - y_1 & z_3 - z_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n - x_1 & y_n - y_1 & z_n - z_1 \end{pmatrix}, \vec{x} = \begin{pmatrix} x - x_1 \\ y - y_1 \\ z - z_1 \end{pmatrix}, \vec{b} = \begin{pmatrix} b_{21} \\ b_{31} \\ \vdots \\ b_{n1} \end{pmatrix} \quad (6)$$

선형화된 식은 선형 최소제곱법을 이용하여 다음 식 (7)과 같이 정확도가 높은 해를 구할 수 있다^[18].

$$\vec{x} = (A^T A)^{-1} A^T \vec{b} \quad (7)$$

하지만 식 (3)에서와 같이 선형화 과정에서 n 개의 연립 방정식이 $n-1$ 개의 방정식으로 줄어들기 때문에 3차원 위치를 결정하기 위해서는 최소 4개의 방정식이 필요하다. 또한, 선형화 과정에서 선형화 오차가 포함되면서 송신기가 수신기의 중앙으로부터 멀어질수록 측위 오차가 증가한다는 단점이 있다^[20].

비선형적 접근법은 뉴턴법^[19]을 적용하여 회귀적인 계산을 통해 근사해를 구하는 방식이다. r_i 를 측정값, \hat{r}_i 를 실제 값이라고 정의하면 측정 오차 f_i 는 $\hat{r}_i - r_i$ 이다. 이때, 측정 오차 제곱의 합 F 를 다음 식 (8)과 같이 정의한다.

$$F(x, y, z) = \sum_{i=1}^n f_i(x, y, z)^2 \quad (8)$$

식 (8)의 값을 최소화하기 위해 양변을 미분한 뒤 다음 식 (9)와 같이 표현한다.

$$J = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x} & \frac{\partial f_1}{\partial y} & \frac{\partial f_1}{\partial z} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x} & \frac{\partial f_2}{\partial y} & \frac{\partial f_2}{\partial z} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x} & \frac{\partial f_n}{\partial y} & \frac{\partial f_n}{\partial z} \end{pmatrix}, \vec{f} = \begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \vdots \\ f_n \end{pmatrix}, \vec{g} = \begin{pmatrix} \frac{\partial F}{\partial x} \\ \frac{\partial F}{\partial y} \\ \frac{\partial F}{\partial z} \end{pmatrix} \quad (9)$$

초깃값을 $\vec{R} = (x, y, z)^T$ 라고 정의하면, 뉴턴법에 의한 근사해는 다음 (10)과 같다.

$$\vec{R}_{k+1} = \vec{R}_k - (J_k^T J_k)^{-1} J_k^T \vec{f}_k \quad (10)$$

k 는 회기 횟수를 의미하며, \vec{R}_{k+1} 과 \vec{R}_k 의 차이가 매우 작을 때까지 시행한다. 비선형적 접근법은 선형화 과정이 없으므로 보다 정확한 해를 얻을 수 있지

만, 뉴턴법을 적용하기 위해서는 해에 근접한 초깃값이 필요하다. 통상 초깃값은 선형적 접근법을 이용하여 구한다. 본 논문에서는 선형적 접근법을 통해 초깃값을 구하고, 비선형적 접근법을 통해 보다 정확한 위치추정 값을 얻었다.

III. 초음파 기반 실내 측위 시스템

기존의 초음파 기반 측위 시스템은 송수신기 간의 시간 동기화를 위해 RF 센서를 이용한다. 정확한 시간 동기화를 위해서 RF 센서는 각 초음파 센서마다 존재한다. 하지만 이는 시스템의 구조적 복잡도를 높이는 원인이기도 하다. 본 논문에서는 RF 신호의 전파속도가 빛의 속도로 매우 빠르다는 점에 착안하여 기존의 초음파 기반 측위 기술에서 초음파 센서의 개수만큼 필요했던 RF 센서의 개수를 1개로 줄이는 방안을 제안한다.

3.1절에서는 기존의 초음파 기반 측위 시스템에 비해 1개의 RF 센서로 간소화된 시스템을 정의하고, 이로 인해 발생하는 시간 동기화 오차에 관해서 기술한다. 3.2절에서는 사전 위치정보에 의한 누적 오차를 최소화시키는 최적의 수신기 배치를 고려하고, 이때 발생하는 위치추정 문제와 수학적 해결 방안에 대하여 설명한다.

3.1 제안 방안 및 시간 동기화 오차

기존의 초음파 기반 측위 시스템은 그림 2.(a)와 같이 복수의 수신기가 공간 내에 임의로 배치되고, 시간 동기화를 위해 초음파 수신기와 RF 수신기가 이웃하여 위치한다. 위치추정을 위해서는 모든 수신기의 위치 좌표를 정확히 알아야 하고, 시간 동기화를 위한 RF 수신기가 초음파 수신기 수만큼 요구되면서 시스템의 복잡도가 높아지는 문제가 발생한다. 반면, 제안 시스템은 그림 2.(b)와 같이 1개의 RF 수신기를 중심으로 일정 반경의 원 위에 초음파 수신기가 배치된다. RF 수신기는 측위 시스템의 기준점이 되고, 이 기준점의 좌표를 통해 나머지 초음파 수신기의 좌표를 얻을 수 있다. RF 수신기는 신호의 수신 여부 판단과 시간 동기화 역할을 하고, 초음파 수신기는 거리측정 임무를 수행한다. N 개의 RF 수신기가 필요했던 기존과 달리 제안 방안에서는 RF 수신기의 개수가 1개로 구성된다.

초음파 신호와 RF 신호는 전파속도 차이로 인해 수신기는 그림 3과 같이 RF 신호를 먼저 수신한 후에 초음파 신호를 수신한다. RF 수신기를 1개만 사용할

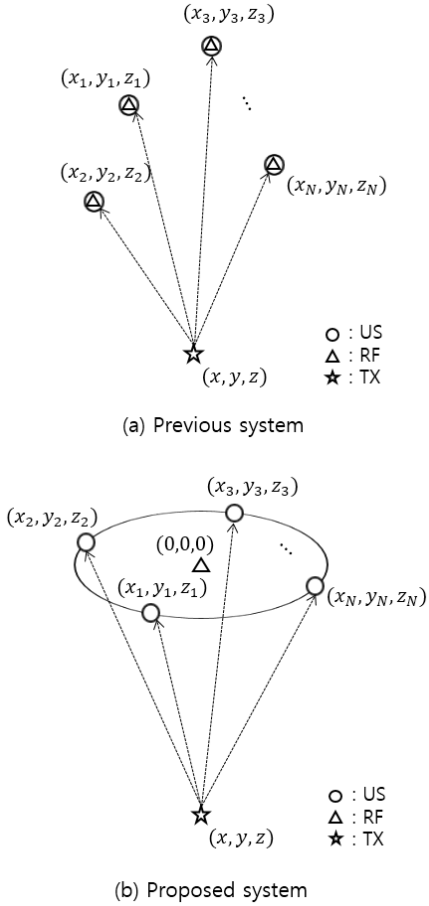


그림 2. (a) 기존 시스템, (b) 제안 시스템
Fig. 2. (a) Previous system, (b) Proposed system

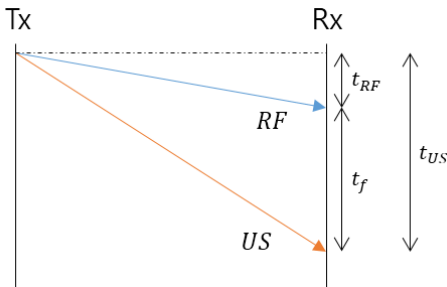


그림 3. 초음파와 RF 신호 도달시간 차이
Fig. 3. Difference of US and RF signal arrival time

경우, 그림 4와 같이 각 초음파 수신기와 RF 수신기 사이의 거리가 서로 r 만큼 이격된다. 초음파 수신기와 RF 수신기의 신호 수신 위치가 서로 달라지면 이에 따른 시간 동기화 오차가 발생한다. 제안 방안에서 발생할 수 있는 최대 시간 동기화 오차를 파악하기 위해

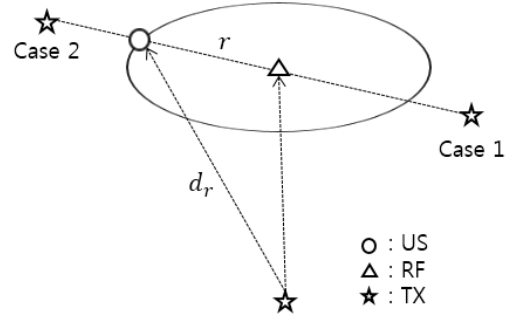


그림 4. 최대 시간 동기화 오차 시나리오
Fig. 4. Maximum time synchronization error scenario

그림 3과 같이 RF 신호의 실제 비행시간을 t_{RF} , 초음파 신호의 실제 비행시간을 t_{US} , 두 신호의 수신시간 차이를 t_f 라고 정의한다. v_{US} 를 초음파 신호의 전파속도, v_{RF} 를 RF 신호의 전파속도라고 할 때, 그림 4에서 초음파 수신기와 송신기 사이의 실제 거리 d_r 는 다음 식 (11)과 같다.

$$d_r = t_{US} \times v_{US} \quad (11)$$

초음파 신호는 20°C의 공기 중에서 344m/s 정도의 전파 속도를 가지고, RF 신호는 3×10^8 m/s 정도의 전파 속도를 가진다. 실내 공간에서는 수신기와 송신기 사이의 거리 d_r 이 수 m 단위가므로, RF 신호의 비행시간 t_{RF} 는 0에 근사한다. 이격 거리 r 에 따른 시간 동기화 오차를 e_{sync} 라고 정의하고, 실제 거리 d_r 에 시간 동기화 오차 e_{sync} 가 포함된 거리를 d_m 라고 정의하면, 식 (3)에 의해 d_m 은 다음 식 (12)와 같다.

$$\begin{aligned} d_m &= t_f \times v_{US} \\ &= (t_{US} - t_{RF}) \times v_{US} \\ &= d_r + e_{sync} \end{aligned} \quad (12)$$

기존의 시스템과 같이 초음파 수신기마다 RF 수신기가 존재하는 경우, 이격 거리 r 을 0으로 간주하므로 시간 동기화 오차 e_{sync} 는 0이다. 하지만 그림 2의 제안 시스템과 같이 초음파 수신기와 RF 수신기의 거리가 멀어질 경우 시간 동기화 오차 e_{sync} 의 값이 커지게 된다.

이격 거리 r 에 따른 시간 동기화 오차가 최대가 되는 조건은 그림 4와 같이 각 송수신기가 동일 평면에 일직선으로 배치된 경우이다. 기존 시스템에서 RF 신호

호가 수신된 시간을 기준으로 보면 Case 1은 RF 신호가 기존 수신시간보다 빨리 수신된 경우이고, Case 2는 RF 신호가 기존 수신시간보다 늦게 수신된 경우를 의미한다. Case 1의 RF 수신시간을 $t_{RF,1}$, Case 2의 RF 수신시간을 $t_{RF,2}$ 라고 하면, 이격 거리 r 에 의한 시간 동기화 오차는 다음 식 (13)과 같다.

$$\begin{aligned} e_{sync,1} &= -t_{RF,1} \times v_{US} \\ e_{sync,2} &= -t_{RF,2} \times v_{US} \end{aligned} \quad (13)$$

이격 거리 r 에 의한 시간 오차를 $t_{RF,r}$ 라 하면, $t_{RF,1}$ 과 $t_{RF,2}$ 는 다음 식 (14)와 같다.

$$\begin{aligned} t_{RF} - t_{RF,r} &= t_{RF,1} \\ t_{RF} + t_{RF,r} &= t_{RF,2} \end{aligned} \quad (14)$$

식 (5)을 식 (4)에 대입하면, 이격 거리 r 에 의한 최대 시간 동기화 오차는 다음 식 (15)와 같다.

$$\begin{aligned} e_{sync,max} &= -(t_{RF} + t_{RF,r}) \times v_{US} \\ &= -\frac{d_r + r}{v_{RF}} \times v_{US} \end{aligned} \quad (15)$$

식 (15)에 근거하면 시간 동기화 오차는 실제 거리 d_r 과 이격 거리 r 에 비례하여 커진다. 실제 거리 d_r 을 5m로 가정하면 이격 거리 r 이 3m일 때, 최대 시간 동기화 오차 $e_{sync,max}$ 는 9μm이고, 이격 거리 r 이 1m일 때, 최대 시간 동기화 오차 $e_{sync,max}$ 는 6μm이다. 이론적으로 수 m 크기의 실내에서 최대 시간 동기화 오차는 수 μm 내외이고, 이에 따른 거리측정 오차는 0.5cm 이내이다. 따라서 방 단위의 실내 공간에서 제안 시스템을 적용할 경우, 1개의 RF 수신기를 사용함으로써 발생하는 시간 동기화 오차는 매우 근소하다.

3.2 초음파 수신기 배치 및 특이 행렬 문제

기존의 초음파 기반 측위 시스템에서는 주로 실내 공간의 모서리마다 수신기를 설치하였다²¹⁾. 수신기를 산개하여 설치할 경우 고정된 모든 수신기의 사전 위치정보를 획득하는 과정에서 측정 오차가 발생하기 쉽다. 반면 그림 2.(b)와 같이 초음파 수신기를 1개의 RF 수신기를 중심으로 일정 반경의 원 위에 일정한 간격으로 배치시키는 경우에는, 1개의 고정된 RF 수신기와 1개의 고정된 초음파 수신기의 사전 위치정보만으로 나머지 초음파 수신기의 위치정보를 획득할

수 있기 때문에 측정 오차에 의한 측위 오차를 최소화할 수 있다. 제안 방안은 1개의 RF 수신기를 중심으로 일정 반경의 원을 가정하고 그 위에 초음파 수신기를 배치시키는 방식이다. N 개의 수신기는 가상의 원 위에 $2\pi/N$ 의 각도로 균일하게 분포될 때 위치 오차 확률이 가장 낮으므로 가상의 원 위에 서로 동일한 간격으로 배치시킨다²²⁾. 또한, 시스템이 차지하는 공간을 최소화하기 위해서 RF 센서와 초음파 센서는 동일한 평면에 위치시킨다.

기존의 초음파 기반 측위 시스템은 주로 선형적 접근법을 통해 위치를 추정한다. 하지만 제안 방안의 평면 배치 방식은 모든 수신기가 같은 높이를 가지므로 동일한 z 값에 의해 특이 행렬 문제를 야기한다. 선형화 과정에서 z 축의 정보를 나타내는 열이 모두 0이 되어 식 (3)의 A 는 특이 행렬이 되고, 특이 행렬은 역행렬이 존재하지 않기 때문에 선형 최소제곱법으로 해를 구할 수 없다. 본 논문에서는 이와 같은 특이 행렬 문제를 해결하기 위해 특이값 분해(SVD : Singular Value Decomposition) 방법을 이용한다. 특이값 분해는 주어진 행렬을 특정한 구조로 분해하는 기법으로 역행렬이 존재하지 않는 특이 행렬의 의사 역행렬을 구하는 방법이다. 식 (3)의 A 는 다음 식 (16)과 같은 구조로 분해할 수 있다¹⁹⁾.

$$A = U\Sigma V^T \quad (16)$$

U 와 V 는 A 의 고유값 분해로 얻은 직교 행렬이고, Σ 는 A 의 고유값으로 이루어진 대각 행렬이다. 이때 Σ 의 대각 원소를 특이값이라고 한다. 여기서 A 의 의사 역행렬 A^+ 은 다음 식 (17)과 같이 구할 수 있다.

$$A^+ = V\Sigma^+ U^T \quad (17)$$

Σ^+ 는 Σ 의 원소 중에서 0이 아닌 특이값을 역수로 취한 전치 행렬을 의미한다. 이를 이용하면 A 가 특이 행렬인 경우에도 다음 식 (18)과 같이 식 (2)의 해를 근사적으로 구할 수 있다.

$$\vec{x} = A^+ \vec{b} \quad (18)$$

IV. 시스템 구현 및 실험 결과

4.1 실험 환경

본 논문에서는 수신기, 송신기 그리고 서버로 시스템을 구성하였다. 송수신기는 40KHz 주파수 대역의

초음파 센서와 447MHz 주파수 대역의 RF 센서를 사용하였고, 아두이노 모듈을 이용하여 각 센서를 제어하였다. 수신기는 1개의 RF 수신기와 2차원 위치 측정 위한 최소 개수인 3개의 초음파 수신기로 구성하였다. 초음파 수신기는 그림 5와 같이 RF 수신기를 원점으로 20cm 반경의 원 위에 정삼각형 모양으로 배치하였다. 실시간 온도 파악을 위해 온도 센서를 구성하였고, 아두이노는 각 센서로부터 신호를 수집한다. 송신기는 1개의 RF 송신기와 1개의 초음파 송신기로 구성된다. 아두이노는 초음파 송신기와 RF 송신기의 송신 신호를 동기화시키는 역할을 한다. 서버는 수신기가 수집한 정보와 각 센서들의 위치를 이용하여 송신기의 위치를 계산한다.

실험은 2m×2m×2m 크기의 실내 공간에서 이루어졌고, 수신기는 천장에 설치하였다. 위치측정은 그림 6과 같이 수신부에서 2m 아래의 평면에서 실시하였다. 평면은 그림 6과 같이 25개의 시험 위치점을 가진다. 각 지점마다 200개씩 거리 데이터를 수집하였다. 수집된 데이터는 10개씩 평균을 내어서 총 20개의 위치추정 값을 얻었다. 위치측정 시, 초음파 송신기의 방향은 천장에 설치된 RF 수신기의 원점을 향하도록 하였다.

본 논문에서는 제안 시스템의 성능 평가를 위해

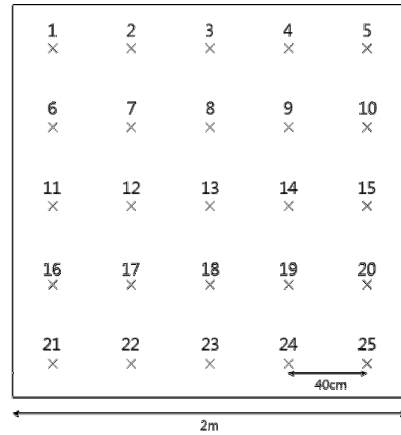


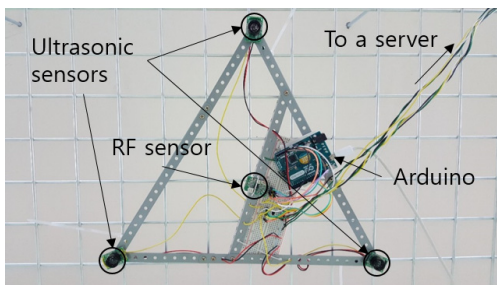
그림 6. 시험 위치점 도면
Fig. 6. Test point scheme

Matlab을 이용하여 시뮬레이션을 진행하였다. 시뮬레이션 환경은 실험 환경과 동일한 환경으로 구성하였으며, 각 위치점마다 300회씩 위치측정을 시행하였다. RF 신호의 전파속도는 빛의 속도로 가정하고, 초음파의 전파속도는 20℃의 온도로 가정하여 반영하였다. 또한, 거리측정 오차의 평균을 0으로 두고, 표준편차를 각각 0.1cm, 0.3cm, 0.5cm인 가우시안 분포로 변화시켜가며 시뮬레이션을 진행하였다.

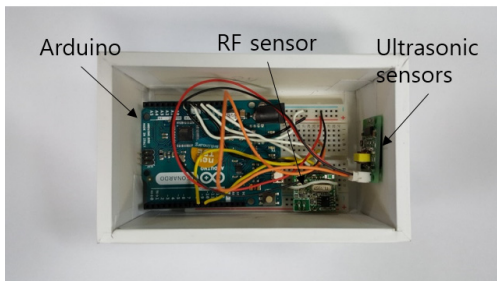
4.2 시뮬레이션 결과

시뮬레이션은 1개의 RF 수신기에 대한 시간 동기화 오차가 위치측정 오차에 영향을 얼마나 미치는지를 측정하기 위해 식 (15)에 근거하여 두 가지 시나리오로 진행하였다. 첫째는 동일 환경에서 초음파 수신기 간의 이격 거리 r 에 따른 위치측정 시나리오이고, 둘째는 측위 공간의 크기 S 에 따른 위치측정 시나리오이다. 추가로, 초음파 수신기의 개수에 따른 위치측정 오차를 측정하기 위해 각 시나리오마다 초음파 수신기의 개수를 변화시켜 보았다. 시스템의 성능 평가는 모든 위치측정 오차의 평균값으로 하였다.

그림 7은 초음파 수신기 간의 이격 거리를 10cm부터 2m까지 변화시켜가며 위치측정 오차 평균을 구한 것이다. 그림 7과 같이 기존 시스템은 초음파 수신기 간의 이격 거리가 멀어질수록 위치측정 오차가 기하급수적으로 줄어든다. 이는 제안 시스템에도 동일하게 나타난다. 그림 7에서 기존 시스템과 제안 시스템의 그래프가 거의 겹치게 나타나는 것은 1개의 RF 수신기에 대한 시간 동기화 오차가 위치측정 오차에 크게 영향을 미치지 않는다는 것을 의미한다. 그림 7에서 초음파 수신기의 개수가 증가함에 따라 위치측정 오



(a) Receiver



(b) Transmitter

그림 5. 구현된 (a) 수신기와 (b) 송신기
Fig. 5. Implemented (a) receiver and (b) transmitter

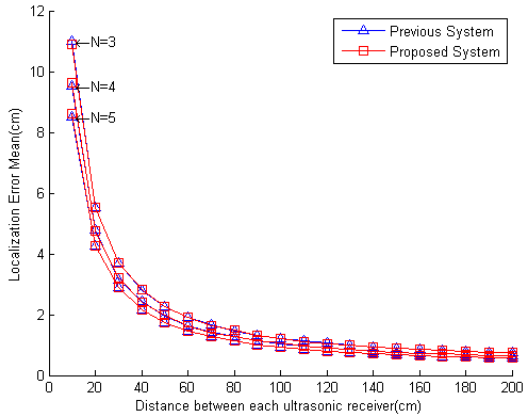


그림 7. 초음파 수신기 간의 거리에 따른 위치측정 오차 평균
Fig. 7. Localization error mean by varying the distance between each ultrasonic receiver

차 그래프가 y축의 음의 방향으로 내려가는 것을 볼 수 있다. 이는 초음파 수신기의 개수가 증가할수록 위치측정 오차가 줄어든다는 것을 의미한다.

그림 8은 측위 공간의 크기를 $1m^3$ 에서 $5m^3$ 로 변화시켜가며 위치측정 오차 평균을 구한 것이다. 그림 8과 같이 기존 시스템은 측위 공간의 크기가 커질수록 위치측정 오차가 증가하고, 이는 제안 방안도 같은 결과이다. 그림 8에서도 기존 시스템의 그래프와 제안 시스템의 그래프는 거의 겹치게 나타나고, 이는 첫째 시나리오와 마찬가지로 1개의 RF 수신기에 대한 시간 동기화 오차가 위치측정 오차에 크게 영향을 미치지 않는다는 것을 의미한다. 그림 8에서도 그림 7과 마찬가지로 초음파 수신기의 개수가 증가함에 따라 위치측정 오차가 줄어든다는 것을 확인할 수 있다.

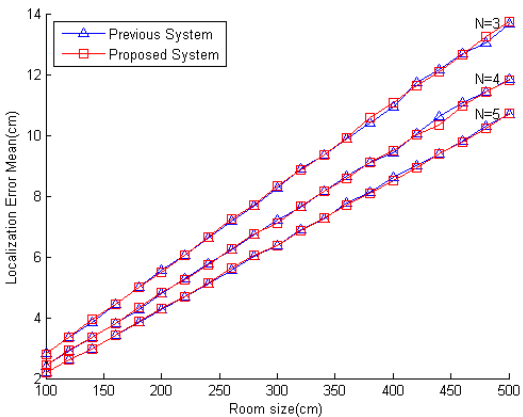


그림 8. 측위 공간의 크기에 따른 위치측정 오차 평균
Fig. 8. Localization error mean by varying the positioning space

4.3 실험 결과

실제 실험에서 거리측정 데이터를 수집하기 전에 초음파 센서의 특성을 보정하는 일은 매우 중요하다. 초음파 센서를 이용한 거리측정 오차는 측정 거리가 멀어질수록 높아지기 때문이다. 그림 9는 본 실험에 사용된 초음파 센서의 특성 방정식을 실제 실험을 통해 구한 것이다. 거리측정에서 가장 이상적인 특성 방정식은 $y=x$ 이다. 하지만 실험 결과 본 논문에서 사용된 초음파 센서의 특성 방정식은 $y=1.064x+5.4$ 로, 이는 실제 실험값을 바탕으로 선형 최소제곱법을 이용하여 구한 것이다. 본 실험에서는 이 특성 방정식을 바탕으로 측정된 거리를 보정하여 사용하였다. 실제 실험 결과, 거리측정 데이터의 표준편차는 0.5cm였다.

그림 10은 시험 위치별 위치추정 결과를 좌표 그래프로 나타낸 것이다. 원 모양은 시험 위치점을 나타낸

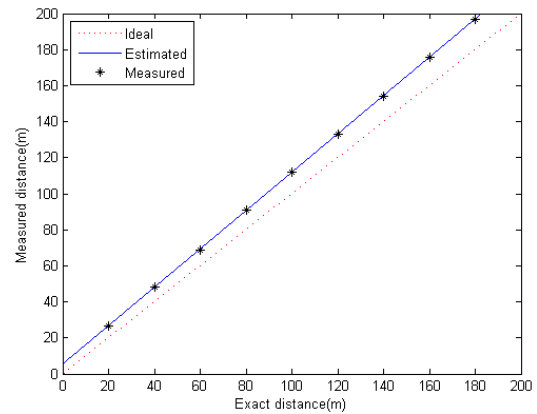


그림 9. 센서 특성 방정식
Fig. 9. Characteristic equation of sensor

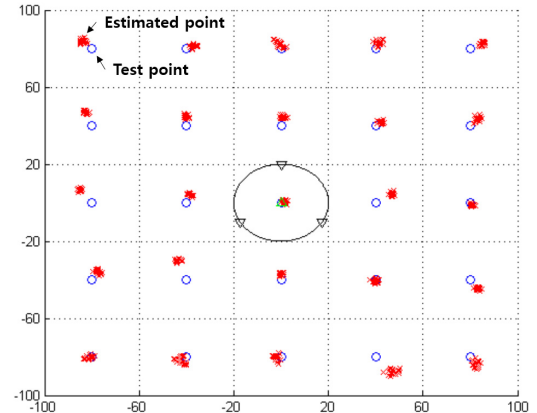


그림 10. 위치측정 결과
Fig. 10. Localization result

것이고 송신기는 해당 위치에 고정된다. 위치추정 결과는 엑스 모양으로 나타내었다. 점선은 각 시험 위치점의 허용 오차 범위를 정사각형 모양의 영역으로 나누는 것이다. 실험 결과, 위치추정 결과의 표준편차는 최대 1.6cm로 시스템이 매우 정밀한 결과를 출력하는 것을 알 수 있다. 또한, 모든 시험 위치점에서 위치추정 결과는 해당 영역 안에 위치하였다. 이는 실내 공간에서 사물의 위치를 명확히 구분할 수 있다는 것을 의미한다. 그림 11은 시험 위치점마다 위치추정 오차를 평균 내고 이를 3차원 그래프로 나타낸 것이다. 모든 위치추정 오차의 평균은 6.1cm이고, 최대 12.9cm의 결과를 보였다.

제안 방안에서 측위 시스템 구성에 필요한 환경 변수들을 충분히 고려하였는지를 평가하기 위해 실험 결과와 시뮬레이션 결과의 누적분포함수(CDF)를 서로 비교하였다. 그림 12에서 제안 시스템의 누적분포함수는 90퍼센트의 확률로 9.5cm의 위치추정 오차를 가진다. 실제 실험에서 거리추정 오차의 표준편차는 0.5cm이었고, 그림 12와 같이 0.5cm의 표준편차 그래프와 실제 실험 결과 그래프가 매우 흡사한 것을 확인할 수 있다. 이는 시스템 설계 단계에서 위치 오차에 영향을 미치는 환경 변수들을 충분히 고려하였음을 의미한다. 거리추정 정확도는 측위 시스템의 성능에 중요한 변수 중 하나이다. 거리추정 정확도가 높을수록 위치추정 정확도는 향상될 것이고, 거리추정 정확도를 높이기 위해서는 거리추정 오차의 표준편차를 낮추어야 한다. Matlab에서 거리추정 오차의 표준편차를 낮추며 시뮬레이션 한 결과, 그림 12와 같이 거리추정 오차의 표준편차가 0.3cm일 때 위치추정 정확도는 90퍼센트의 확률로 5.7cm이었고, 거리추정 오차의 표준편차가 0.1cm일 때 위치추정 정확도는 90퍼센

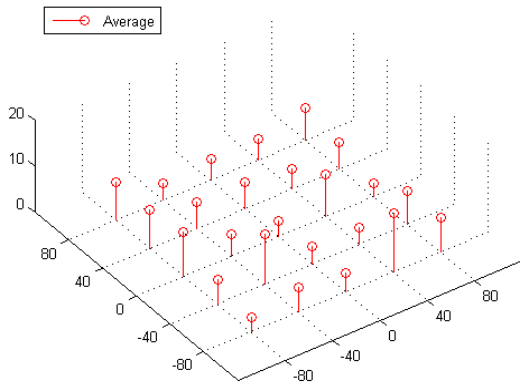


그림 11. 위치추정 오차의 평균
Fig. 11. Average of localization error

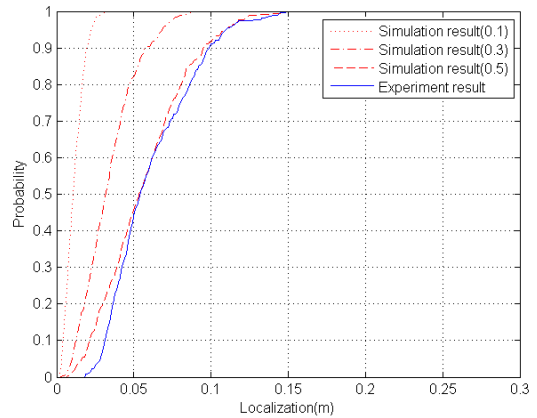


그림 12. 위치추정 오차의 누적분포함수
Fig. 12. CDF of localization error

트의 확률로 1.9cm이었다. 이는 측위 시스템의 거리추정 정확도가 정밀할수록 시스템의 측위 성능 또한 높아진다는 것을 의미한다. 따라서 정밀도가 높은 프로세서를 이용하여 측위 시스템을 구현하면 보다 정확한 측위가 가능하다.

V. 결론

본 논문은 실내 공간에서 정밀한 위치 측정을 위해 초음파와 RF로 구성된 실내 측위 시스템을 제안하였다. 기존에 제안된 초음파 기반 측위 시스템의 시스템 복잡도 문제를 해결하기 위해, 복수의 초음파 수신기와 하나의 RF 수신기로 구성된 수신시스템과, 하나의 초음파 송신기와 하나의 RF 송신기로 구성된 송신시스템으로 새로운 측위 시스템을 제안하였다. 또한, 고정된 수신기의 사전 위치정보 획득 과정에서 발생할 수 있는 측정 오차를 최소화하기 위해 최적의 수신기 배치 방안을 제안하였다. 제안 방안의 성능 평가를 위해 시뮬레이션과 더불어 아두이노 모듈을 이용하여 실제 시스템을 제작하여 실험하였다. 위치추정 실험을 위해 2m×2m×2m 크기의 공간에서 평면 바닥의 25개 시험 위치점을 설정하고, 각 시험 위치점마다 200개 씩 측정 데이터를 수집하였다. 실험 결과, 위치추정 오차의 평균은 6.1cm, 표준 편차는 1.6cm이었으며, 이는 Matlab 시뮬레이션을 통해 예상했던 결과와 유사하게 나왔다.

본 논문에서는 실내 측위 시스템에서 단일 송신기에 국한하여 연구를 진행하였다. 만일 복수의 송신기들이 동시에 신호를 전송할 경우, 신호 충돌에 의한 측위 시스템의 성능 저하가 발생할 수 있다. 따라서

복수의 송신기를 고려한 신호처리 및 통신 방법에 대한 연구는 향후 과제로 남긴다.

References

- [1] S. Nam, M. Park, K. Kim, and S. Kim, "A study on the regulations and market of location based service (LBS)," *J. Internet Comput. and Serv. (JICS)*, vol. 15, no. 4, pp. 141-152, Aug. 2014.
- [2] C. Jensen, H. Lu, and B. Yang, "Indoor - a new data management frontier," *IEEE Data Eng. Bull.*, vol. 33, no. 2, pp. 12-17, Jun. 2010.
- [3] B. Hofmann-Wellenhof, H. Lichtenegger, and J. Collins, *Global positioning system: Theory and Practice*, 4th Ed., Springer-Verlag, 1997.
- [4] J. Kim and D. Seo, "Effect of the log normal-Nakagami faded interferers on imperfect power-controlled DS/CDMA cellular system," *J. KICS*, vol. 24, no. 8, pp. 1163-1168, Aug. 1999.
- [5] U.S. Government, *Global Positioning System Standard Positioning Service Performance Standard(2008)*, Retrieved Sept., 27, 2016, from <http://www.gps.gov>.
- [6] 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. 2010.
- [7] G. Fischer, O. Klymenko, D. Martynenko, and H. Lüdiger, "An impulse radio UWB transceiver with high precision TOA measurement unit," *IEEE IPIN Int. Conf.*, pp. 1-8, Sept. 2010.
- [8] C. Lee, Y. Chang, G. Park, J. Ryu, S. Jeong, S. Park, J. Park, H. Lee, K. Hong, and M. Lee, "Indoor positioning system based on incident angles of infrared emitters," *IECON 30th Annu. Conf. IEEE*, vol. 3, pp. 2218-2222, Nov. 2004.
- [9] C. Medina, J. C. Segura, and A. De la Torre, "Ultrasound indoor positioning system based on a low-power wireless sensor network providing sub-centimeter accuracy," *Sensors*, vol. 13, no. 3, pp. 3501-3526, 2013.
- [10] F. Seco, C. Plegemann, A. Jiménez, and W. Burgard, "Improving RFID-based indoor positioning accuracy using Gaussian processes," *IEEE IPIN Int. Conf.*, pp. 1-8, Sept. 2010.
- [11] C. Y. Choi and D. M. Lee, "Localization algorithm for moving objects based on maximum measurement value in WPAN," *J. KICS*, vol. 39, no. 5, pp. 407-412, May 2014.
- [12] H. Ahn, T. Thuy, and Y. Lee, "Bluetooth beacon planing considering position estimation accuracy in small and isolated indoor environment," *J. KICS*, vol. 40, no. 7, pp. 1307-1312, Jul. 2015.
- [13] H. Liu, H. Darabi, P. Banerjee, and J. Liu, "Survey of wireless indoor positioning techniques and systems," *IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Appl. and Rev.)*, vol. 37, no. 6, pp. 1067-1080, 2007.
- [14] R. Mautz, "Indoor positioning technologies," Habilitation Thesis, Civil, Environmental and Geomatic Eng., ETH Zurich, Feb. 2012.
- [15] S. Ravindra and S. Jagadeesha, "Time of arrival based localization in wireless sensor networks : a non-linear approach," *SIPIJ*, vol. 6, no. 1, Feb. 2015.
- [16] G. Shen, R. Zetik, and R. S. Thoma, "Performance comparison of TOA and TDOA based location estimation algorithms in LOS environment," in *IEEE Positioning, Navig. and Commun., WPNC 2008*, pp. 71-78, Mar. 2008.
- [17] P. Rong and M. Sichitiu, "Angle of arrival localization for wireless sensor networks," in *3rd Annu. IEEE SECON*, vol. 1, pp. 374-382, Sept. 2006.
- [18] I. Guvenc, C. Chong, and F. Watanabe, "Analysis of a linear least-squares localization technique in LOS and NLOS environments," *IEEE VTC Spring*, pp. 1886-1890, Apr. 2007.
- [19] W. Murphy and W. Hereman, "Determination of a position in three dimensions using

trilateration and approximate distances,” Department of Mathematical and Computer Sciences, Colorado School of Mines, Golden, Colorado, MCS-95-07, 1995.

- [20] S. Song, D. Ban, Y. Kim, and S. Kwon, “Analysis of linearization error of linear least square for indoor positioning,” in *Proc. KICS Int. Conf. Commun.*, pp. 1554-1555, Jun. 2015
- [21] V. Filonenko, C. Cullen, and J. D. Carswell, “Indoor positioning for smartphones using asynchronous ultrasound trilateration,” *ISPRS Int. J. Geo-Information*, vol. 2, no. 3, pp. 598-620, 2013.
- [22] K. Tong, X. Wang, A. Khabbazibasmenj, and A. Dounavis, “Optimum reference node deployment for TOA-based localization,” *IEEE Int. Conf. Commun. (ICC)*, pp. 3252-3256, Jun. 2015.

조 백 두 (Back-doo Zho)



2016년 2월 : 울산대학교 전기공학부 졸업
 2016년 3월~현재 : 울산대학교 전기공학부 석사과정
 <관심분야> 위치 측위, 추정 이론, 통신 공학, 센서 네트워크, 신호처리, 고장진단

권 성 오 (Sungoh Kwon)



1994년 2월 : KAIST 전기 및 전자공학과 학사
 1996년 2월 : KAIST 전기 및 전자공학과 석사
 1996년 3월~2001년 1월 : 신세기통신 기술연구소
 2007년 8월 : Purdue University ECE 박사

2007년 8월~2010년 2월 : 삼성전자 DMC연구소 수석연구원
 2010년 3월~2014년 3월 : 울산대학교 전기공학부 조교수
 2014년 4월~현재 : 울산대학교 전기공학부 부교수
 <관심분야> 이동통신 네트워크, MAC 설계, 간섭제어, 최적화, 신호처리, 뇌공학

천 성 은 (Seong-eun Cheon)



1995년 2월 : 고려대학교 전자공학과 졸업
 1995년~1997년 : (주)엘지반도체 기술연구소 연구원
 2000년~2003년 : (주)지메이트 정보통신연구소 선임연구원
 2003년~2006년 : (주)현대디지탈테크 부설연구소 책임연구원

2006년~2011년 : (주)시소시스템 대표이사
 2017년~현재 : (주)스페이스코드 대표이사
 <관심분야> 실내측위, 센서네트워크, 자동제어, 통신시스템