

실내 바닥 환경에서 2.4 GHz 대역 경로 손실 측정

박 경 민*, 이 정 용*, 유 원 태**, 김 성 철[○]

Path-Loss Measurements in Indoor Floor Environment at 2.4 GHz

Kyoung-Min Park*, Jung-Yong Lee*, Wontae Yu**, Seong-Cheol Kim[○]

요 약

애드혹 무선 센서 네트워크(Ad-Hoc Wireless Sensor Networks)는 저전력, 저가 등 그 효율성 때문에 다양한 분야에서 연구되고 있다. 애드혹 무선 센서 네트워크가 실내에서 이용될 때, 특히 센서의 위치가 땅과 가까운 경우에는 무선 채널 환경 특성을 이론적으로 분석하기 어렵다. 따라서 본 논문에서는 몇 가지 일반적인 실내 환경에서 안테나의 높이를 극단적으로 낮춘 뒤 수신 신호 세기(Received Signal Strength) 측정을 통하여 경로 손실 지수(Path-Loss Exponent)를 추정 하였다. 측정 결과 안테나의 높이가 낮을 때 경로 손실 지수가 안테나의 높이가 1m 내의 일 때와 크게 차이가 나는 것을 확인하였다.

Key Words : Sensor Networks, Antenna Height, Path-Loss Measurements

ABSTRACT

Ad-Hoc Wireless Sensor Networks have been studied in various field because of its efficiency like low power, low cost, and so forth. When it is used in indoor environment, especially when sensors are close to the ground, analysis of wireless channel characteristic is quite hard. In this paper, we estimated the Path-Loss Exponent by measuring Received Signal Strength in several indoor environments while lowering the antenna height extremely. As a result, we were able to confirm that the Path-Loss Exponent at low-antenna condition is quite different from that at general condition.

1. 서 론

애드혹 무선 센서 네트워크(Ad-Hoc Wireless Sensor Networks)는 유선망과 기지국 없이 이동호스트로만 이루어진 통신망을 의미한다. 이 네트워크는 수많은 저전력, 저가의 센서들을 이용하며 이 때문에 네트워크의 구성과 철회가 용이하여 군 기술에 많이 이용된다. 또한 군 기술뿐만 아니라 온도나 소음 등

주위 환경에 대한 관찰과 통제, 스마트 룸, 로봇 제어 등 다양한 분야에서 활용되고 있기 때문에 그 연구에 대한 필요성이 계속하여 대두되고 있다. 이 네트워크가 적절한 분야에 알맞게 활용되기 위해서는 센서들의 위치를 추정하는 것이 필수적이기 때문에 측위 시스템에 대한 고찰 또한 항상 함께 고려되어야 한다^[1].

측위 시스템은 먼저 이용하는 환경에 따라 실내 측위와 실외 측위로 나눌 수 있다. 실외 측위의 경우

* This research was supported by a grant to Bio-Mimetic Robot Research Center funded by Defense Acquisition Program Administration

• First Author : Seoul National University Department of Electrical and Computer Engineering, rudals319@maxwell.snu.ac.kr, 학생회원

○ Corresponding Author : Seoul National University Department of Electrical and Computer Engineering, sckim@maxwell.snu.ac.kr, 종신회원

* Seoul National University Department of Electrical and Computer Engineering, fire3420@maxwell.snu.ac.kr, 학생회원

** Seoul National University Department of Electrical and Computer Engineering, drakens@maxwell.snu.ac.kr, 학생회원

논문번호 : KICS2017-04-106, Received April 11, 2017; Revised June 30, 2017; Accepted July 4, 2017

GPS(Global Positioning System)을 이용하는 것이 일반적이며, GPS 위성들로부터 전송받은 무선 통신 신호를 이용하여 센서 혹은 무선 단말기가 자신의 위치를 쉽게 파악할 수 있다. 그러나 실내 측위 시스템을 이용하는 경우 GPS 신호가 실내까지 도달하지 못하는 경우가 많으며, 신호가 도달하더라도 LOS(Line of Sight)가 확보되지 않기 때문에 측위 결과의 신뢰성이 떨어지게 된다. 그러므로 실내 환경에서는 센서들 간의 무선통신 정보만을 이용하여 센서들의 위치를 추정해야 한다. 이러한 이유로 여러 측위 방법들이 제안되어 왔으며 계속하여 연구가 진행 중이다²⁾. 측위 시스템은 또한 크게 Range free 방식과 Range based 방식으로 나뉘게 된다.

Range free 방식은 센서들 간의 최단 경로의 홑수를 이용하여 센서 사이의 거리를 추정한다. 거리 추정을 위하여 다른 알고리즘이 필요하지 않기 때문에 효율성 측면에서 저가의 센서들을 이용하는 애드혹 무선 센서 네트워크에 적합할 수 있으나 홑수에 따라 거리가 비례하는 등방성 (isotropic) 네트워크 이외에 비등방성 (anisotropic) 네트워크에서는 실제 거리에 비하여 큰 오차가 발생하게 된다. 이 네트워크에서는 최단 경로의 우회가 발생하기 때문이다. 비등방성 네트워크의 원인으로는 불균일한 센서 분포, 지형, 장애물, 전파환경 등이 있으며 실내 환경에서는 그 영향이 실외보다 더욱 크다. 최단경로의 우회에 따른 측위 오차를 줄이기 위한 많은 Range free 측위 알고리즘이 연구되어 왔으나³⁾ filter 기반 알고리즘이 대부분이기 때문에 센서들의 실시간 이동성을 고려하지 못한다는 단점을 가진다.

Range based 방식은 수신된 전파를 이용하여 센서 사이의 거리를 추정하는 알고리즘을 이용하는 방식이다. Range free 방식에 비하여 거리 추정을 위한 알고리즘을 따로 수행하기 때문에 추정 결과의 신뢰도는 더 높다. 이는 전파의 도달시간을 기반으로 하는 TOA(Time of Arrival)⁴⁾와 TDOA(Time Difference of Arrival)⁵⁾, 전파 수신강도를 기반으로 하는 RSSI(Received Signal Strength Indicator)방식⁶⁾으로 나눌 수 있다. TOA 기술은 다른 기술에 비해 NLOS(Non Line of Sight)환경에 대해서 강점을 가지고 있기 때문에 전파 환경의 예측이 어려운 실내 환경에 적합하다. 그러나 수신기와 송신기 간의 정확한 시간 동기화가 필요하기 때문에 TOA기반 측위는 간단한 센서를 이용하여 수행하기 매우 힘들다. TDOA 방식은 송수신기 간 시간 동기화 부분을 해결해 줄 수 있으나 마찬가지로 제한적인 하드웨어를 이용하여 수

행하기 어렵다. 이러한 이유로 주로 저전력, 저가의 센서로 구성되는 애드혹 무선 센서 네트워크에서는 TOA, TDOA 측위 기술을 적용하기 매우 힘들다. RSSI 방식은 신호의 세기가 거리에 따라 감소하는 정도를 계산하여 송수신기 사이의 거리를 추정하는 방법이다. 이는 수신 신호 강도만을 이용하기 때문에 전파 환경의 영향을 크게 받아 다른 방법에 비하여 상당히 큰 오차를 보인다. 그러나 간단한 하드웨어만으로 구현이 쉽고 연산량이 적기 때문에 애드혹 무선 센서 네트워크에 적합하다⁷⁾. 때문에 측위의 부정확함에도 불구하고 그 경제성 때문에 애드혹 센서 네트워크에서 매우 많이 활용되고 있다. 이는 이미 알려져 있는 경로 손실 모델(Path-Loss Model)을 이용하며, 전파 환경이 이상적인 경우 경로 손실 지수(Path-Loss Exponent)가 이상적인 수치이며 예측 가능하기 때문에 비교적 정확한 거리 추정이 가능하나 경로 손실 지수는 전파 환경에 따라 달라진다. 특히 실내 환경에서는 예측 불가능한 상황이 매우 많기 때문에 경로 손실 지수를 정확하게 추정하기 어렵다. 이러한 이유로 다양한 환경에서 경로 손실 지수를 모델링 하는 연구들이 진행되어 왔다. 또한 같은 실내 환경에서도 센서가 바닥 가까이 배치되어 있는 경우 경로 손실 지수가 크게 달라진다. 최근 센서들이 점점 소형화됨에 따라 센서가 바닥 근처에 있는 상황이 많이 발생한다. 특히 애드혹 센서 네트워크의 경우 센서의 구조가 간단하기 때문에 더욱 소형화에 대한 고려가 필요하며 많은 센서들로 구성되어 다양한 형태로 센서들이 분배되어 있기 때문에 다양한 전파 환경에서의 RSSI 측위 시스템 적용을 위해서는 센서가 땅과 가까운 경우도 경로 손실 지수의 적절한 모델링이 필요하다. 그러나 대부분의 경로 지수 모델에 관한 연구는 안테나의 높이를 1m 이상으로 가정하고 진행 되었다⁸⁾. 따라서 본 논문에서는 몇 가지 일반적인 실내 환경에서 안테나의 높이를 극단적으로 낮게 하여 측정된 수신 신호 세기로부터 경로 손실 지수를 추정하여 안테나의 높이가 1m 내외일 때의 값과 비교하였다.

본 논문은 2장에서 RSSI를 이용할 때 사용하는 경로 손실 모델과 경로 손실 지수에 대하여 설명하고, 3장에서 실제 실내 환경에서 안테나의 높이를 매우 낮게 하여 경로 손실 지수를 추정된 결과를 제시한다. 4장에서 결과에 대한 분석을 제시하며, 5장에서 결론을 내린다.

II. 모 델

송신단으로부터 송신된 신호의 세기는 거리에 비례

하여 감쇄한다. 수신단에서 수신된 신호의 세기를 측정하여 거리에 대한 감쇄정도로부터 송수신단 사이의 거리를 추정하는 방식을 RSSI라고 하며 이는 복잡한 하드웨어없이 간단한 식으로 구현이 가능하다. 때문에 저가의 센서들을 이용하는 애드혹 센서 네트워크에서 센서들의 위치를 추정할 때 일반적으로 이용하는 방식이다. 감쇄되는 신호의 세기를 모델링 하는 경로 손실 모델은 다음과 같다.

$$P(d)[dB] = P_0 - 10n \log_{10}(d/d_0) + X_\sigma \quad (1)$$

P_0 는 기준 신호 세기로써 기준거리인 d_0 에서 수신된 신호의 세기를 나타내며 이는 사용하는 소자에 따라 다르다. X_σ 는 전파 전파 중에 발생하는 반사, 산란, 회절에 의하여 발생하는 대규모 페이딩(Large-Scale Fading)을 나타낸다. 일반적으로 가우시안 랜덤 과정으로 가정한다. n 은 전파 환경의 영향을 받는 경로 손실 지수로써, 자유 공간에서는 $n=2$ 의 값을 가진다. n 이 클수록 송수신단 사이의 전파 환경이 좋지 않음을 의미한다. 경로 손실 모델을 기반으로 수신단에서 수신된 신호의 세기로부터 송수신단 사이의 거리를 추정하면 다음과 같다.

$$\hat{d} = d_0 \times 10^{-\frac{P - P_0 - X_\sigma}{10 \cdot n}} \quad (2)$$

RSSI 측위의 경우 경로 손실 지수를 정확하게 아는가의 여부가 결과에 큰 영향을 미친다. 때문에 전파 환경에 따라 적절한 경로 손실 지수를 이용하는 것이 중요하고 실제 측정을 통하여 특정 환경에서 경로 손실 지수를 모델링 하는 것은 RSSI 측위 시스템에 유의미한 기여를 한다.

III. 측정

3.1 측정 시스템

본 논문에서는 2.4-2.5GHz 대역에 대하여 측정실험을 수행하였으며, 벡터 회로망 분석기 (Anritsu MS4644)를 이용하여 2.4-2.5GHz 대역을 10kHz 단위의 협대역의 주파수 신호들로 분할하여 측정하는 방법으로 진행하였다. 수신단에는 27dB 이득을 갖는 LNA(Low-Noise Amplifier)를 연결하였고, 안테나는 송수신단 모두 5dBi의 이득을 갖는 다이폴 안테나를 사용하였다. 측정을 시작하기 전에는 안테나, 케이블,

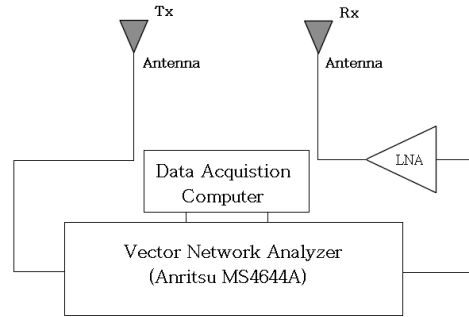


그림 1. 측정 시스템의 블록 다이어그램
Fig. 1. Block diagram of the measurements system

LNA 등의 영향을 제거하기 위하여 영점조정 (Calibration)을 수행하였다.

3.2 측정 시나리오

측정은 일반적인 실내 환경 특징을 가지는 서울대학교 뉴미디어통신연구소의 강의실, 천장이 높은 1층 로비, 좁은 복도에서 수행되었으며 같은 환경에서 송수신기의 높이가 0.1m, 1.3m인 경우에 대하여 한 번씩 총 두 번 수행하였다. 각 환경의 구조는 아래의 그림에 표현하였다.

각 환경에서 경로 손실 지수를 얻기 위하여 송신단으로부터 1m씩 거리를 변화시켜가며 수신단에서 수신 신호 세기를 측정하였다. 한 지점에서 2.4-2.5GHz 대역의 협대역 신호들의 평균을 이용하였으며 안테나가 이동성을 가질 때 다중 경로의 합에 의하여 반파장 이내의 거리에서 발생하는 소규모 페이딩(Small-Scale Fading)의 영향을 무시할 수 없으므로 거리를 변화시켜가며 측정하는 과정에서 각 거리별 중심점을 주위

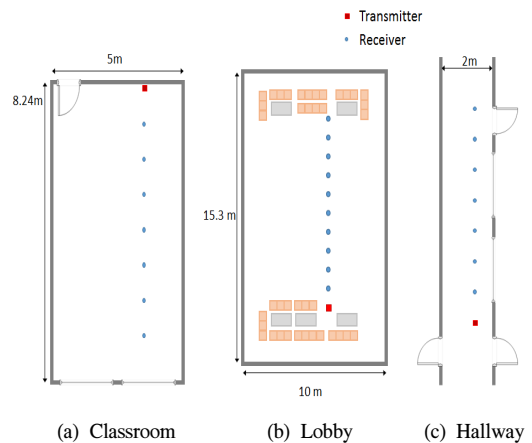


그림 2. 측정 환경
Fig. 2. Measurements Environments

로 16개의 지점(4×4 그리드)에 대하여 측정을 수행하였다. 경로 손실 지수를 얻는 과정에서는 소규모 페이딩 효과를 제거하고 전파 거리에 의한 감쇄 효과만을 얻어야하므로 16개 지점에서 얻어진 수신 신호 세기를 모두 종합한 후 측정 지점을 수신 신호 세기에 선형회귀분석하여 경로 손실 모델을 구축하였다. 그리드의 간격은 2.4GHz 대역의 반파장인 6.25cm로 하였다.

3.3 측정 결과

각 환경에서 식 (1)의 경로 손실 지수 n 을 추정하기 위하여 측정 지점을 수신 신호 세기에 선형회귀분석하였다. 그 결과는 아래의 그림과 표에 표현하였다. 로그거리는 $\log_{10}(d/d_0)$ 를 의미하며 d 는 측정 지점과 송신단으로부터의 거리, d_0 는 기준 거리인 1m를 의

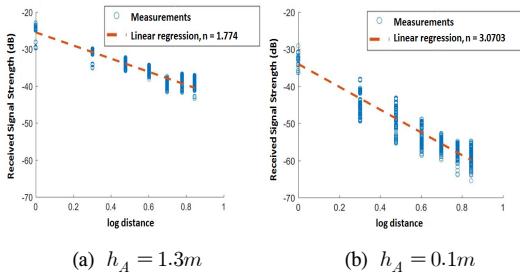


그림 3. 강의실 환경에서 경로 손실 모델 추정
Fig. 3. Path-Loss model estimation in classroom

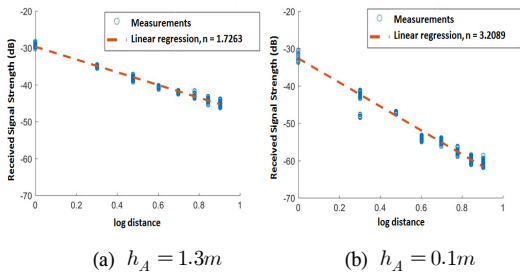


그림 4. 로비 환경에서 경로 손실 모델 추정
Fig. 4. Path-Loss model estimation in Lobby

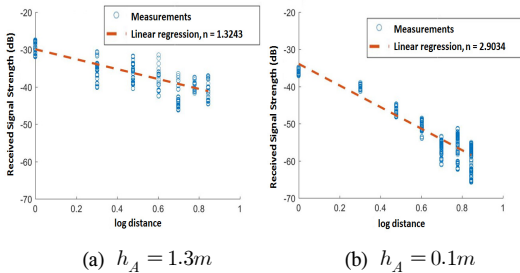


그림 5. 복도 환경에서 경로 손실 모델 추정
Fig. 5. Path-Loss model estimation in Hallway

표 1. 각 환경에서 추정된 경로 손실 지수 n
Table 1. The Path-Loss Exponent estimated in each environment

	Classroom	Lobby	Hallway
$h_A = 1.3m$	1.77	1.73	1.32
$h_A = 0.1m$	3.07	3.21	2.90

미한다. h_A 는 각각의 상황에서 송수신 안테나와 땅과의 거리를 의미한다.

IV. 분석

4.1 프레넬영역

프레넬 영역(Fresnel zone)은 전파가 송신기에서 수신기로 전파될 때, 거리 비례 감쇄 이외의 다른 영향을 받지 않기 위하여 확보해야 할 영역을 제시하는 타원체이다. 프레넬 영역은 수신기에 도달하는 직접파와 한 번 반사돼서 도달하는 반사파의 경로차이를 기준으로 삼는다. 수신기에 직접 도달하는 직접파와 송신기와 수신기를 장축의 끝점으로 하는 가상의 타원체에 접하는 어떤 물체에 반사된 반사파와의 경로차이가 전파의 반파장일 때, 그 타원체를 제 1프레넬 영역이라고 한다. 프레넬 영역의 차수는 경로차이가 늘어남에 따라 늘어나며 프레넬 영역의 차수 n_f 에 관한 일반식은 다음과 같다⁹⁾.

$$r_d - r_r = n_f \frac{\lambda}{2} \quad (3)$$

식 (3)에서 r_d 는 수신기까지 도달한 직접파가 전파한 경로, r_r 은 n_f 차 프레넬 영역에 접하는 물체에 한 번 반사된 반사파가 전파한 경로를 의미한다. 보통 수신기에 도달하는 직접파와 반사파의 경로차이가 클 때는 반사파가 더 많은 거리 감쇄를 겪어 그 세기가 직접파에 비하여 많이 작기 때문에 제 1프레넬 영역까지만 고려한다. 제 1프레넬 영역이 충분히 확보되었을 때 자유 공간으로 가정하며 그 때의 경로 손실 지수는 이상적인 수치인 $n = 2$ 이다. 제 1프레넬 영역 안쪽에 전파의 반사를 야기하는 물체가 존재하면 직접파와 반사파의 경로차이가 크게 나지 않아 세기가 비슷하며, 반사되면서 위상 변이를 일으키기 때문에 수신단에서 반사파가 직접파를 상쇄시키게 된다. 이때 전파 환경은 매우 나빠지므로 경로 손실 지수는 $n = 2$ 보다 큰 값을 보이게 된다.

4.2 안테나 높이의 영향

3장의 결과로부터 측정을 수행한 모든 환경에서 송수신단의 안테나의 높이가 낮을 때의 경로 손실 지수가 안테나가 높은 조건보다 매우 큼을 알 수 있다. 이는 안테나의 높이가 매우 낮아 송수신단 사이의 제 1 프레넬 영역에 땅이 들어오기 때문이다. 제 1 프레넬 영역의 확보가 땅에 의하여 힘들다는 관점에서 안테나가 매우 낮은 환경은 송수신단 사이의 거리가 매우 먼 환경과 비슷한 해석이 가능하다. 송수신단 사이의 거리가 먼 환경에서 땅에 반사된 전파는 직접파와 경로 차이가 많이 나지 않아 신호의 세기가 거의 엇비슷하고 반사파는 반사되면서 위상 변이를 일으키게 된다. 땅과 공기는 상대 유전율의 차이가 크기 때문에 반사 계수는 -1에 매우 가깝다고 가정한다. 이 때문에 수신단 쪽에서 상쇄가 발생하게 되며 송수신단 사이의 거리가 굉장히 먼 경우 경로 손실 지수는 4에 근접한다. 경로 손실 지수가 4가 되는 순간은 제 1 프레넬 영역이 땅에 접하는 순간을 이론적인 기준으로 잡는다. 그 기준은 다음과 같다^[10].

$$d_b = \frac{4h_T h_R}{\lambda} \quad (4)$$

식 (4)에서 d_b 는 경로 손실 지수가 4가 되는 순간의 송수신단 사이의 거리를 의미하고, 이를 중단점 거리 (Breakpoint distance)라고 한다. h_T, h_R 은 각각 송신 안테나와 수신 안테나의 높이를 의미한다. λ 는 전파하는 전파의 파장을 의미한다.

본 논문에서 측정한 조건은 식 (4)의 h_T, h_R 이 매우 작은 조건이기 때문에 중단점 거리 d_b 또한 매우 작아진다. 본 논문에서 측정한 조건인 송수신 안테나의 높이 $h_T = h_R = 0.1m$ 이고 전파의 파장 $\lambda = 0.125m$ 인 경우의 중단점 거리는 $0.32m$ 로 경로 손실 지수가 큰 환경이다. 따라서 송수신 안테나의 높이가 매우 낮을 때 높은 경로 손실 지수를 보이는 것이다. 반대로 충분히 안테나의 높이가 확보된 경우, $h_T = h_R = 1.3m$, $\lambda = 0.125m$ 일 때의 중단점 거리는 $54.08m$ 로 추정된 경로 손실 지수가 이상적인 수치인 2에 가까운 수치를 보인다. 또한 실내 환경은 바닥이 대부분 시멘트 재질로 실외 환경의 땅보다 낮은 유전율을 가지기 때문에 추정된 경로 손실 지수가 완벽하게 4에 가깝지 않다. 측정 결과로부터 실외 전파 환경에서 고려하는 중단점 거리 모델을 안테나의 높이가 매우 낮은 실내 전파 환경에서도 고려할 수 있다는 것

을 알 수 있다. 결과로부터 실내 환경에서 소형 센서들을 이용하여 RSSI 측위 시스템을 구성할 때 중단점 거리 모델을 고려하여 측위의 정확성을 높일 수 있다는 것을 알 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 실내에서 애드혹 무선 센서 네트워크를 이용할 때 발생할 수 있는 세 가지 무선 채널 환경을 준비한 뒤, 각 환경에서 수신 신호의 세기를 측정하여 경로 손실 모델을 구축하였다. 각 환경에서 다른 모든 조건은 동일하게 하고 안테나의 높이를 다르게 설정하고 한 번씩 측정하여 안테나의 높이가 경로 손실 모델에 미치는 영향을 분석하였다. 같은 환경에서 안테나의 높이가 매우 낮은 경우, 안테나의 높이가 1m 내외 일 때에 비하여 경로 손실 지수가 크게 추정되는 것을 확인하였다. 이는 제 1 프레넬 영역의 확보가 땅에 의하여 잘 되지 않음을 의미하고 같은 관점에서 사용하는 모델인 중단점 거리 모델에 대한 분석을 수행하였다. 이 모델은 실외 전파 환경에서 송수신단 사이의 거리가 매우 멀 때 경로 손실 지수를 이상적인 수치의 두 배로 해석하는 모델로써 본 논문에서 가정한 환경과 비슷한 구조를 지닌다. 본 논문에서 측정한 측정 결과를 이용하여 구축한 경로 손실 모델이 실내에서 안테나의 높이가 땅과 매우 가까운 소형 센서들을 이용하여 RSSI 측위 시스템을 구성하는 데에 작지 않은 기여를 함을 확인하였다.

References

- [1] C. Savarese, J. M. Rabaey, and J. Beutel, "Location in distributed ad-hoc wireless sensor networks," in *IEEE ICASSP'01*, vol. 4, pp. 2037-2040, Salt Lake City, USA, May 2001.
- [2] S. R. Go, "Effective ToA-Based indoor localization method considering accuracy in wireless sensor networks," *J. KICS*, vol. 41, no. 6, pp. 640-651, Jun. 2016.
- [3] H. W. Kim and S. W. Kim, "Bayesian filter-based mobile tracking under realistic network setting," *J. KICS*, vol. 41, no. 9, pp. 1060-1068, Sept. 2016.
- [4] R. Kaune, "Accuracy studies for TDOA and TOA localization," in *IEEE FUSION*, pp. 408-415, Singapore, Jul. 2012.

- [5] Kaune, Regina, Julian Hörst, and Wolfgang Koch, "Accuracy analysis for TDOA localization in sensor networks," *IEEE FUSION*, pp. 1-8, Chicago, USA, Jul. 2011.
- [6] J. K. Lee, "An efficient trilateration algorithm for wireless sensor network localization," in *Proc. IEEE VTS APWCS*, Singapore, Aug. 2011.
- [7] J. K. Lee, S. R. Lee, and S. C. Kim, "Analysis of localization scheme for ship application using received signal strength," *J. KICS*, vol. 39C, no. 8, pp. 643-650, Aug. 2014.
- [8] K. M. Park, J. Y. Lee, W. T. Yu, and S. C. Kim, "Antenna height-dependent path-loss measurements in indoor environment at 2.4 GHz," in *Proc. KICS Winter Conf.*, pp. 142-143, Gangwon, Korea, Jan. 2017.
- [9] H. D. Hristov, *Fresnal Zones in Wireless Links, Zone Plate Lenses and Antennas*, Artech House, Inc., 2000.
- [10] S. R. Saunders and A. Aragon-Zavala, *Antennas and propagation for wireless communication systems*, John Wiley & Sons, 2008.

박 경 민 (Kyoung-Min Park)



2016년 2월 : 아주대학교 전자공학과 학사
 2016년 3월~현재 : 서울대학교 전기·정보 공학부 석사과정
 <관심분야> 무선 통신 공학

이 정 용 (Jung-Yong Lee)



2013년 2월 : 서울대학교 전기·컴퓨터 공학부 학사
 2013년 3월~현재 : 서울대학교 전기·컴퓨터 공학부 박사과정
 <관심분야> 무선 통신 공학

유 원 태 (Wontae Yu)



2011년 2월 : 숭실대학교 정보통신전자공학부 학사
 2013년 8월 : 서울대학교 전기·정보 공학부 석사
 2014년 3월~현재 : 서울대학교 전기·정보 공학부 박사과정
 <관심분야> 무선통신 채널 모델링, 위치 추위

김 성 철 (Seong-Cheol Kim)



1984년 2월 : 서울대학교 전기공학과 학사
 1987년 2월 : 서울대학교 전기공학과 석사
 1995년 2월 : 미국 폴리테크닉 대학교 박사
 1995년~1999년 : AT&T Bell Lab. Member of Technical Staff
 1999년~현재 : 서울대학교 전기·정보 공학부 교수
 <관심분야> 무선 통신 공학