

# 벽 바깥의 앵커를 이용한 이동성 단말기의 측위 기법

안진현\*, 강준혁°, 설동민\*

## Positioning Method of Mobile Nodes Supported by Anchors Outside of Walls

Jin-Hyun Ahn\*, Joonhyuk Kang°, Dong-Min Seol\*

요 약

이 논문에서의 주된 연구 주제는, 벽 바깥에 앵커들이 위치한 상황에서, 벽으로 둘러싸인 지역에 있는 단말의 위치를 무선 통신을 이용하여 추정하는 기법의 성능 개선에 관한 것이다. 이를 위해 먼저 굴절의 법칙을 바탕으로, 벽으로 인해 유도되는 신호의 지연이 수학적으로 유도된다. 이 신호 지연의 모델링을 바탕으로, 벽으로 인해 일어나는 위치추정 성능 하락이 보상되는, 간단하지만 탁월한 측위 기법이 제안된다. 모의실험 상으로는, 본 논문에서 제안된 기법의 적용 시에 벽으로 인해 생기는 성능 하락이 완벽하게 보상될 수 있다는 점이 특이할만하다. 추가적으로, 제안된 측위 기법의 성능은 본 논문에서 제안되는 wall-dilution-of-precision (W-DoP)을 바탕으로 분석된다. 이 분석을 통해서, 본 논문에서 제안된 측위 기법의 적용 시에, 벽으로 인한 성능 하락이 완벽하게 보상될 수 있는 것의 타당성이 증명된다. 또한, 이 분석을 통해, 본 논문에서 가정된 상황같이 벽이 앵커(anchor)와 태그(tag) 사이에 존재할 때 W-DoP가 앵커 배치를 위한 합리적인 기준이 될 수 있다는 것이 보여진다. 마지막으로, 본 논문에서는 현실적인 모의실험을 위해 신호를 통한 거리 측정의 오차가 매우 엄격하고 세밀하게 가정되었다.

**Key Words** : positioning algorithm, indoor positioning, dilution of precision, sensor network, wireless communication

### ABSTRACT

In this work, it is aimed to estimate the location of nodes in a blind area surrounded by walls, where the anchors are located outside of the walls, based on wireless network. First of all, delay of signal caused by walls is mathematically modeled applying the law of refraction. Base on the modeling of delay, this work proposes a simple and novel positioning method that overcomes degradation of positioning accuracy caused by walls. It is noteworthy that the proposed positioning method can perfectly compensate for the degradation. In addition, the performance of the proposed method is analyzed with Wall-dilution-of-precision (W-DoP), which is established in this work. The analysis validates the fact that the proposed method can perfectly compensate for the degradation. Moreover, the analysis implies that W-DoP can be used as a metric for determining arrangement of anchors when there exist walls between tag and anchors. It is remarkable that ranging errors in this work are assumed very rigorously for practical simulation.

\* 본 연구는 방위사업청과 방위산업기술지원센터(계약번호 UD160005D)의 연구비 지원에 의한 연구 결과임.

♦ First Author : Korea Advanced Institute of Science and Technology, wlsqus3396@kaist.ac.kr, 학생회원

° Corresponding Author : Korea Advanced Institute of Science and Technology, jhkang@ee.kaist.ac.kr, 종신회원

\* LIGNex1, dongmin.seol@lignex1.com

논문번호 : KICS201908-157-C-RU, Received August 13, 2019; Revised August 21, 2019; Accepted August 21, 2019

## I. 서 론

근래에, 무선 통신 기술을 기반으로 하는 측위 기법은 군을 비롯한 상업인 분야에서 광범위하게 적용되고 있다<sup>1-3)</sup>. 실외 측위에 있어서는, 위성을 통한 측위 기법인 글로벌 포지셔닝 시스템 (global positioning system)이 잘 구축되어 널리 쓰이고 있으며 실내 측위에 있어서는 파형 연구를 비롯한 여러 연구가 진행되고 있다. 다만 이런 측위 기법은 앵커 (anchor)와 태그 (tag) 사이에 벽과 같은 장애물이 있을 때 심각하게 성능이 하락하는 일괄적인 문제가 있다<sup>4)</sup>. 이것은 두 가지 이유 때문인데, 첫 번째 이유는 높이 낮은 세기로 송신된 신호는 벽을 뚫고 수신되기가 쉽지 않기 때문이다. 두 번째 이유는 신호가 벽을 뚫고 수신되었다 하더라도, 벽을 지날 때에 생긴 신호 지연 때문에 측정된 거리가 실제 거리보다 길게 측정되기 때문이다.

본 연구는 이러한 이유로 유발되는 측위 기법의 성능 하락을 개선하고자 시작되었다. 실제로, 무선 통신이 기반이 되는 많은 위치 추정 상황에서 앵커와 태그 사이에 벽과 같은 장애물이 존재하게 되는데, 한 가지를 들자면 건물에 화재가 난 재난 상황을 생각할 수 있다. 건물 내부에 위치한 인명 구조를 위해서는, 사전 위치 파악이 필수적이고 앞서 언급된, 본 논문에서 가정되는 측위 환경이 필연적으로 발생하게 된다. 이때, 위치 추정 기법의 성능은 인명 구조와 직접적인 상관을 갖으며, 본 논문에서 제안되는 측위 기법의 적용을 통해 벽으로 인한 측위 성능 하락이 개선될 수 있다.

본 논문에서는 먼저, 앵커와 태그 사이에 벽이 존재하는 환경에서 앵커에서 측정되는 앵커-태그 사이의 측정 거리가 수학적으로 모델링된다. 이 거리는 굴절의 법칙을 적용하여 유클리드 거리 (Euclidean distance), 벽의 굴절률, 벽의 두께, 벽과 앵커-태그 사이의 line-of-sight (LoS)가 이루는 각도를 통해 모델링된다. 이후, 앵커-태그 사이에 벽과 같은 장애물이 존재하는 환경에서, 간단하지만 탁월한 성능 보상을 보이는 측위 기법을 제안한다. 제안되는 기법은 기본적으로 측정 거리가 이용되는 모든 측위 알고리즘에 적용될 수 있으며, 특별히 본 논문에서는 측정 거리 오차에 다소 강인함을 보이는 반복적 측위 알고리즘<sup>5)</sup>에 적용된다. 모의실험 상으로는, 본 논문에서 제안한 기법의 적용을 통해 벽으로 인해 생기는 성능 하락을 완벽하게 보상할 수 있다는 것이 확인된다.

본 논문에서 제안되는 측위 기법의 핵심적인 직관은, 측정 거리가 이용되는 측위 알고리즘에서 유클리

드 거리 대신에 벽이 고려되어 모델링된 거리가 도입되는 것이다. 특별히, 반복적 측위 알고리즘에서 사용되는 레지듀얼 (residual)과 자코비안 행렬 (Jacobian matrix)에 대해서, 벽이 고려되어 모델링된 거리를 기반으로 새로 유도되어 적용된다. 본 논문에서 고려되는 반복적 측위 알고리즘의 종류는 Gauss-Newton 알고리즘 (GN), Levenberg-Marquardt 알고리즘 (LM), Steepest Descent 알고리즘 (SD)<sup>6)</sup>이다. 실제로 벽으로 유도되는 측정 거리의 지연은 기존의 측위 알고리즘에서 시간 오프셋 (time offset)이나 오차의 바이어스 (bias)를 다루는 방식으로는 처리될 수 없다<sup>6)</sup>. 이는 벽으로 인해 유도되는 지연은 앵커의 위치, 태그의 위치, 벽의 위치, 벽의 굴절률, 벽의 두께에 따라 결정되는 값으로 확률 변수로 모델링될 수 없기 때문이다.

제안되는 측위 기법은  $w$ 이 벽의 두께이고  $\rho$ 이 벽의 굴절률일 때  $w(\rho - 1)$ 값이 알려져 있어야 적용될 수 있다. 벽의 두께 및 굴절률이 알려져 있지 않은 상황을 위해 본 논문에서는 추가적으로 벽의  $w(\rho - 1)$  값을 추정할 수 있는 간단한 기법이 제안된다. 이는 앵커-앵커 사이의 거리와 실제 거리와의 차이를 통해 추정된다. 마지막으로, 본 논문에서 제안되는 측위 기법의 성능은 앵커의 배치의 효율을 나타내는 dilution-of-precision (DoP)의 측면에서 분석된다. 기존의 DoP는 본 논문에서 가정하는 환경에서 적용될 수 없기 때문에 벽을 고려하여 새롭게 유도한 wall-dilution-of-precision (W-DoP)가 제안되고, 이를 통해 제안되는 측위 기법의 성능이 분석된다. DoP와 W-DoP 값을 비교하여, 제안되는 측위 기법의 적용을 통해, 벽으로 인해 유도되는 성능 하락이 완벽히 보상될 수 있다는 것이 타당하게 설명되며 W-DoP와 DoP가 함께 사용되는 것이 앵커 배치를 위한 적절한 기준이 됨이 보여 진다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 측위 환경모델과 앞서 언급한 측정 거리의 수학적 모델링에 대해서 살펴본다. 3장에서는 측위 기법과 이의 모의실험 결과를 살펴본다. 4장에서는 W-DoP의 유도와 이를 통한 제안된 측위 기법의 성능 분석을 하고 마지막으로 5장에서 본 논문의 결론을 맺는다.

## II. 시스템 모델

본 논문에서는 앵커, 태그, 벽의 위치가 3차원 유클리드 공간에서 가정된다. 그림 1과 같이 앵커들은 벽 바깥에 위치되고, 각 앵커에서는 벽 안에 위치하는 태

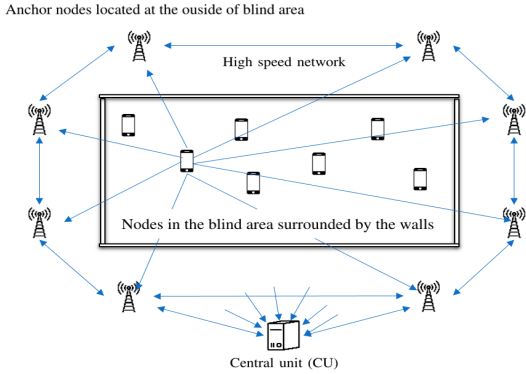


그림 1. 시스템 모델의 예시  
Fig. 1. An example of system model

그에서 송신되는 신호가 수신된다. 앵커들과 고속 네트워크로 연결된 중앙 처리 장치 (central unit)에서는 모든 앵커들이 측정된 time-of-flight (ToF) 혹은 태그와의 거리를 통해, 태그의 위치가 추정된다. 태그의 위치는 앵커의 위치를 기준으로 한 상대 위치가 추정되며 이는 앵커의 위치가 기준이 되어 절대 위치로 변환 가능하다. 간단한 계산을 위해서 앵커들의 시간 동기화가 가정된다. 또한 중앙 처리 장치에서의 위치 추정 시에, 벽의 위치 정보 혹은 기하학적 정보가 알려져 있다고 가정한다.

앞서 언급된 대로, 본 논문에서는 현실적인 모의실험 결과를 위해 측정 거리 오차가 엄격하게 가정된다. 두 가지 오차의 합으로 가정되는데, 첫 번째 가정되는 오차는 신호의 non-line-of-sight (NLoS) 성분으로 인해 발생하는 오차인데<sup>6)</sup>, 앵커에서 ToF가 측정될 때 신호의 LoS 성분 대신에 NLoS 성분이 탐지되어 생기는 오차이다. 두 번째로 가정되는 오차는 측정 기기에서의 부정확한 측정으로 인해 생기며 측정기기의 성능에 따라 분포가 결정되는 오차이다<sup>6,7)</sup>.

다음으로는, 앞서 가정한 측위 환경 하에서, 한 앵커에서 측정된 앵커-태그 사이의 거리가 모델링된다. 본 논문에서는 앞서 언급된 대로, 벽으로 인한

신호의 지연이 고려되어, 실제 거리보다 길게 측정되는 길이가 포함된다. 벽으로 인해서 길게 측정되는 것은 신호가 굴절되고, 벽 속에서 진행될 때, 공기 중에서도 느린 속도로 진행되기 때문인데, 이에 대해서 구체적으로 설명하자면 다음과 같다. 먼저 그림 2는  $p$ 에서  $s$ 로 신호가 진행되는 상황을 나타내는데, 벽을 고려하지 않고 유클리드 거리만 모델링하면 측정 거리는  $\overline{ps}$ 가 된다. 하지만 벽으로 인한 굴절과 벽 속에서 느려진 신호의 속도를 고려하면 측정 거리는

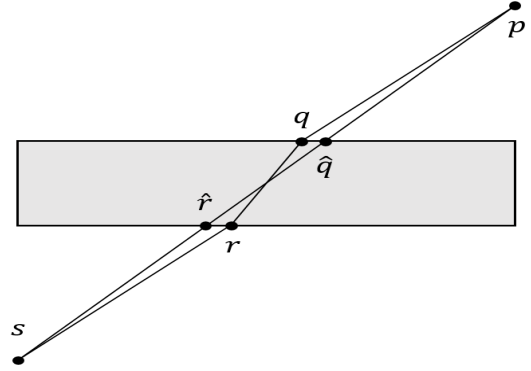


그림 2. 벽을 투과하는 신호의 굴절  
Fig. 2. Refraction of signal penetrating a wall

$\rho$ 가 벽의 굴절률일 때,  $\overline{pq} + \rho\overline{qr} + \overline{rs}$ 가 된다. 하지만 이를 앵커와 태그의 위치로 모델링하기 쉽지 않다. 따라서 본 논문에서는 신호가 굴절됨으로 인한 측정 거리 차이는 고려하지 않은  $\overline{p\hat{q}} + \rho\overline{\hat{q}\hat{r}} + \overline{\hat{r}s}$ 으로 근사하여 모델링된다.

다음은 위에서 설명된 신호의 지연을 기반으로  $i$ 번째 앵커에서 측정된 거리를 모델링한 수식이다.

$$d_i = d_i(\mathbf{x}) + \sum_{k \in W_{i,\mathbf{x}}} f_{i,k}(\mathbf{x})l_k + n_N + n_M \quad (1)$$

$i$ : 앵커의 순서,  $i = 1, \dots, N$

$\mathbf{x} = (x, y, z)$ : 태그의 가상 위치

$\mathbf{x}_i = (x_i, y_i, z_i)$ :  $i$ 번째 앵커의 위치

$d_i(\mathbf{x}) = \|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i\|_2$ :  $\mathbf{x}$ 와  $\mathbf{x}_i$  사이의 유클리드 거리

$k$ : 벽의 순서,  $k = 1, \dots, W$

$W_{i,\mathbf{x}}$ :  $\mathbf{x}$ 와  $\mathbf{x}_i$  사이의 LoS와 겹치는 벽의 순서의 집합

$l_k = w_k(\rho_k - 1)$ :  $k$ 번째 벽의 특성 정보

$w_k$ :  $k$ 번째 벽의 두께

$\rho_k$ :  $k$ 번째 벽의 굴절률

$n_N$ : 수신신호의 NLoS 성분으로 인한 측정 거리 오차

$n_M$ : 측정 기기에서의 부정확한 측정으로 인한 오차

$f_{i,k}(\mathbf{x})$ :  $\mathbf{x}$ 와  $\mathbf{x}_i$  사이의 LoS가  $k$ 번째 벽과 겹쳐지는 길이가  $w_k$ 로 나뉜 값

$f_{i,k}(\mathbf{x})$ 를 설명하기 위해 예를 들자면 다음과 같은데, 먼저  $\mathbf{x}$ 와  $\mathbf{x}_i$  사이의 LoS가  $k$ 번째 벽과 이루는 각도가  $90^\circ$ 라면 겹쳐지는 길이가  $w_k$ 이므로

$f_{i,k}(\mathbf{x})$ 는 1의 값을 갖는다. 만약  $\mathbf{x}$ 와  $\mathbf{x}_i$  사이의 LoS가  $k$ 번째 벽과 이루는 각도가  $45^\circ$  라면 겹쳐지는 길이가  $\sqrt{2}w_k$ 이므로  $f_{i,k}(\mathbf{x})$ 는  $\sqrt{2}$ 의 값을 갖는다.  $f_{i,k}(\mathbf{x})$ 는 신호가 벽을 투과하는 길이만큼 지연되는 것이 반영되는 기하학적 값으로써, 앵커의 위치, 벽의 위치, 태그의 가상 위치에 따라 결정된다. 추가적으로  $k$ 번째 벽이  $x-z$  평면과 평행하다면  $f_{i,k}(\mathbf{x})$ 는 아래와 같다.

$$f_{i,k}(\mathbf{x}) = \frac{d_i(\mathbf{x})}{\sqrt{(y-y_i)^2}} \quad (2)$$

또한  $k$ 번째 벽이  $y-z$  평면과 평행하다면  $f_{i,k}(\mathbf{x})$ 는 다음과 같다.

$$f_{i,k}(\mathbf{x}) = \frac{d_i(\mathbf{x})}{\sqrt{(x-x_i)^2}} \quad (3)$$

식 (1)에서 특이할만한 점은 측정 거리 오차와 유클리드 거리에  $\sum_{k \in W_{i,z}} f_{i,k}(\mathbf{x})l_k$ 이 추가되었다는 점이다. 추가된 이 항의 의미는 태그가  $\mathbf{x}$ 에 위치한다고 가정할 때, 태그에서 송신된 신호가  $i$ 번째 앵커에서 수신될 때까지 투과된 벽들로 인해 신호가 지연되어, 앵커에서 길게 측정된 길이이다.

### III. 측위 기법

본 논문에서 제안되는 측위 기법의 핵심은, 벽이 있는 환경이 고려되어 측정 거리가 모델링된 식 (1)의 수식이 적용되어, 기존의 반복 측위 알고리즘이 개선되는 것이다. 구체적으로, 본 논문에서는 대표적인 반복 알고리즘인 GN, LM, SD이 고려된다. 따라서 본 장에서는 앞서 제안된 식 (1)의 모델링이 반복 측위 알고리즘에 적용되는 방법에 대해 설명한다. 또한 현실적인 알고리즘 적용을 돕는 벽의 특성 정보 추정 기법이 제안되며, 모의실험을 통해, 제안된 반복 측위 기법의 성능이 보여 진다.

#### 3.1 반복 측위 알고리즘

본 절에서는 기존의 반복 측위 알고리즘이 간략히 설명되며 이와 관련된 수학적 모델링이 소개 된다. 먼저, GN, LM, SD을 포함한 기존의 반복 측위 알고리

즘에서는 아래의 수식이 비용 함수 (cost function)으로 고려된다.

$$\sum_{i=1}^N (d_i - d_i(\mathbf{x}))^2 = (\mathbf{d} - \mathbf{d}(\mathbf{x}))^T (\mathbf{d} - \mathbf{d}(\mathbf{x})) \quad (4)$$

여기서  $\mathbf{d} = (d_1, \dots, d_N)^T$ 는 앵커에서 측정된 ToF에 빛의 속도가 곱해져 얻어진, 앵커-태그 사이의 추정 거리이고

$\mathbf{d}(\mathbf{x}) = (d_1(\mathbf{x}), \dots, d_N(\mathbf{x}))^T$ 는 태그가  $\mathbf{x}$ 에 위치한다고 가정할 때에 모델링 (유클리드 거리)을 바탕으로 얻어진 앵커-태그 사이의 거리이다. 이 때,  $\mathbf{d} - \mathbf{d}(\mathbf{x})$ 가 레지듀얼이 되며, 이 레지듀얼의 자코비안 행렬은  $\mathbf{J}(\mathbf{x})$ 라고 하자. 반복측 측위 알고리즘에서는 먼저 비용 함수인 식 (4)를 최소화하는  $\mathbf{x}$ 의 값을 얻어내는 것이 목표가 된다. 다만 이는 3차원 weighted least square 문제<sup>[5]</sup>이기 때문에 해석적으로 접근하는 것이 불가능하다. 따라서 반복 측위 알고리즘에서는 자코비안 행렬  $\mathbf{J}(\mathbf{x})$ 를 바탕으로,  $\mathbf{x}$ 의 값이 점진적으로 변화되어가면서 (4)가 최소화되는 값이 얻어진다.

#### 3.2 개선된 반복 측위 알고리즘

본 절에서는, 3.1 절에서 소개된 반복 측위 알고리즘에 식 (1)의 모델링이 적용되어 개선된, 반복 측위 알고리즘이 설명된다. 따라서 먼저  $\mathbf{x}$ 와 각 앵커 사이의 유클리드 거리로 정의된  $\mathbf{d}(\mathbf{x}) = (d_1(\mathbf{x}), \dots, d_N(\mathbf{x}))^T$ 를 아래와 같이 대체하고자 한다.

$$\hat{\mathbf{d}}(\mathbf{x}) = (\hat{d}_1(\mathbf{x}), \dots, \hat{d}_N(\mathbf{x}))^T \quad (5)$$

$$\hat{d}_i(\mathbf{x}) = d_i(\mathbf{x}) + \sum_{k \in W_{i,z}} f_{i,k}(\mathbf{x})l_k \quad (6)$$

따라서 개선된 측위 알고리즘에서는 아래의 수식이 비용 함수로 고려된다.

$$\sum_{i=1}^N (d_i - \hat{d}_i(\mathbf{x}))^2 = (\mathbf{d} - \hat{\mathbf{d}}(\mathbf{x}))^T (\mathbf{d} - \hat{\mathbf{d}}(\mathbf{x})) \quad (7)$$

또한  $\mathbf{d} - \hat{\mathbf{d}}(\mathbf{x})$ 가 레지듀얼이 되며, 이 레지듀얼의 자코비안 행렬은  $\hat{\mathbf{J}}(\mathbf{x})$ 라고 하자. 결론적으로 GN, LM, SD을 포함한 기존의 반복 측위 알고리즘은 새로

정의된 레지듀얼과 자코비안 행렬이 적용되어 개선된다.  $\hat{\mathcal{J}}(\mathbf{x})$ 에 대해서 예시를 들자면, 다음과 같다. 모든 벽이  $x-z$  평면이나  $y-z$  평면에 평행하다면 식 (2)와 식 (3)을 이용하여  $\hat{\mathcal{J}}(\mathbf{x})$ 를 계산할 수 있다. 그 결과로,  $W_{vert}$ 가  $y-z$  평면에 평행한 벽의 순서의 집합이고  $W_{hor}$ 이  $x-z$  평면에 평행한 벽의 순서의 집합일 때,  $\hat{\mathcal{J}}(\mathbf{x})$ 의 첫 번째 열의 성분은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \frac{x_i - x}{d_i(\mathbf{x})} + \frac{x_i - x}{d_i(\mathbf{x})\sqrt{(y - y_i)^2}} \sum_{k \in W_{hor}} l_k \\ & + \left( \frac{x_i - x}{d_i(\mathbf{x})\sqrt{(x - x_i)^2}} - \frac{d_i(\mathbf{x})}{(x_i - x)\sqrt{(x - x_i)^2}} \right) \\ & \cdot \sum_{k \in W_{vert}} l_k \end{aligned} \quad (8)$$

두 번째 열의 성분은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \frac{y_i - y}{d_i(\mathbf{x})} + \frac{y_i - y}{d_i(\mathbf{x})\sqrt{(x - x_i)^2}} \sum_{k \in W_{vert}} l_k \\ & + \left( \frac{y_i - y}{d_i(\mathbf{x})\sqrt{(y - y_i)^2}} - \frac{d_i(\mathbf{x})}{(y_i - y)\sqrt{(y - y_i)^2}} \right) \\ & \cdot \sum_{k \in W_{hor}} l_k \end{aligned} \quad (9)$$

세 번째 열의 성분은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \frac{z_i - z}{d_i(\mathbf{x})} + \frac{z_i - z}{d_i(\mathbf{x})\sqrt{(y - y_i)^2}} \sum_{k \in W_{hor}} l_k \\ & + \frac{z_i - z}{d_i(\mathbf{x})\sqrt{(x - x_i)^2}} \sum_{k \in W_{vert}} l_k \end{aligned} \quad (10)$$

추가적으로 측정 거리 오차에 관한 접근에 대해 다루고자 한다. 먼저 기존의 연구<sup>6)</sup>에서 볼 수 있듯이, 측정 거리 오차의 바이어스가 (혹은 측정 거리 오차의 평균값) 알려져 있다면, 각 앵커에서 측정된 거리에서 바이어스를 일괄적으로 빼서 측위 알고리즘의 성능이

개선될 수 있다. 본 논문의 모델링 하에서는, 앞서 설명된 측위 알고리즘에서  $\mathbf{d} = (d_1, \dots, d_N)^T$  대신

$$\tilde{\mathbf{d}} = (d_1 - E[n_N + n_M], \dots, d_N - E[n_N + n_M])^T \quad (11)$$

이 적용되는 것이다. 추후 소개되는 모의실험의 결과에서는, 이 측정 거리 오차를 다루는 방식이 적용된 반복 측위 알고리즘의 성능과 적용되지 않은 알고리즘의 성능을 함께 나타낸다.

### 3.3 벽의 특성 정보 추정 기법

3.2 절의 반복 측위 알고리즘이 적용되기 위해서는 모든 벽에 대해서 앞서 정의된 벽의 특성 정보,  $w_k(\rho_k - 1)$ ,  $k = 1, \dots, W$ 가 알려져 있어야 한다. 벽의 굴절률과 두께가 알려져 있지 않은 경우를 고려하여, 본 절에서는 벽의 특성 정보를 추정하는 간단한 기법이 제안된다.

먼저 측위 알고리즘을 적용하기 전에,  $\hat{\mathbf{x}}_i$ ,  $i = 1, \dots, \hat{N}$ 의 위치에 앵커를 배치한다. 이 때 다음과 같은 조건을 만족시키는 앵커의 순서쌍 집합  $A \subseteq \{(i, j) | i \in \{1, \dots, \hat{N}\}, j \in \{1, \dots, \hat{N}\}\}$ 가 존재해야 한다.:

“모든  $(i, j) \in A$ 에 대해서,  $\hat{\mathbf{x}}_i$ 와  $\hat{\mathbf{x}}_j$  사이의 LoS가 지나는 벽들의 집합이 일치해선 안 된다. 또한 어떤  $k$ 번째 벽에 대해서도,  $(i, j) \in A$ 가 존재해서,  $\hat{\mathbf{x}}_i$ 와  $\hat{\mathbf{x}}_j$  사이의 LoS가  $k$ 번째 벽과 겹쳐야 한다. 마지막으로  $A$ 의 원소의 수는 벽의 수인  $W$ 와 같아야 한다.”

이러한 가정 하의 모든 순서쌍  $(i, j) \in A$ 의 앵커들에 대해서,  $i$ 번째 앵커와  $j$ 번째 앵커 사이의 거리  $d_{i,j}$ 를 측정하면 다음과 같이 나타내진다.

$$d_{i,j} = d_i(\mathbf{x}_j) + \sum_{k \in W_{i,j}} f_{i,k}(\mathbf{x}_j)l_k + n_N + n_M \quad (12)$$

위 식에서  $W_{i,j}$ 는 앞서  $i$ 번째 앵커와  $j$ 번째 앵커를 잇는 LoS와 겹치는 벽의 순서의 집합을 나타낸다. 이 과정을 수차례 반복하여 평균을 나타내면 다음과 같다.

$$E[d_{i,j}] = d_i(\mathbf{x}_j) + \sum_{k \in W_{i,j}} f_{i,k}(\mathbf{x}_j)l_k + E[n_N + n_M] \quad (13)$$

이 때, 측정 거리 오차의 바이어스가 (혹은 측정 거리 오차의 평균값) 알려져 있다면, 모든  $(i, j) \in A$ 에 대해서, 식 (13)으로 이루어진 연립방정식을 풀어 모든 벽의 특성 정보를 얻을 수 있다. 이는 앵커들의 순서쌍 집합의 정의 때문이다. 만약 이 때, 측정 거리 오차의 바이어스가 (혹은 측정 거리 오차의 평균값) 알려져 있지 않다면, 이를 0으로 두고 연립방정식을 풀으로써 벽의 특성 정보를 추정할 수 있다.

### 3.4 모의실험 및 결과

본 절에서는 앞서 제안된 측위 기법의 성능을 보이기 위해 실시된 모의실험이 소개되고 그 결과가 설명된다. 첫 번째로, 모의실험 환경과 실험 변수는 다음과 같다. 벽으로 둘러싸인 지역은  $[-20, 20] \times [-20, 20] \times [0, 20]$ 이고, 네 개의 벽  $\{W_i\}_{i=1}^4$ 은 순서대로 각각

$$\begin{aligned} & [20, 20.5] \times [-20, 20] \times [0, 20], \\ & [-20, 20] \times [20, 20.5] \times [0, 20], \\ & [-20.5, -20] \times [-20, 20] \times [0, 20], \\ & [-20, 20] \times [-20.5, -20] \times [0, 20], \end{aligned}$$

에 위치하며 0.5의 두께를 갖는다. 또한 네 개의 벽에 대해서 2.73의 굴절률이 가정된다. 앵커 배치에 대해서는 4개의 앵커가 가정되며  $\{\mathbf{x}_i\}_{i=1}^4$ 의 위치는 순서대로  $(35, 0, 0)$ ,  $(0, 35, 3)$ ,  $(-35, 0, 0)$ ,  $(0, -35, 3)$ 이다. 측정 거리 오차에 대해서는, 측정 기기에서의 부정확한 측정으로 인한 오차인  $n_M$ 은 평균을 0, 표준편차를 0.1로 갖는 정규 분포가 가정된다<sup>7)</sup>. 또한 수신신호의 NLoS 성분으로 인한 측정 거리 오차인  $n_N$ 은 IEEE 802.15.4a<sup>18)</sup>에서 정의된 다섯 가지 종류의 채널 (1 ~ 5번 채널)을 바탕으로 모델링된 이산 확률 변수로 가정되었다.

앞서 언급된 대로 본 논문에서는 두 가지 서로 다른 환경에 대해 고려하여 측위 성능을 보고자 하는데 이는 다음과 같다.

환경 (1): 측정 거리 오차의 바이어스가 (측정 거리 오차의 평균값) 알려져 있는 환경, 혹은  $E[n_N + n_M]$  값이 알려져 있는 환경

환경 (2): 측정 거리 오차의 바이어스가 (측정 거리 오차의 평균값) 알려져 있지 않은 환경, 혹은

$E[n_N + n_M]$  값이 알려져 있지 않은 환경

추후, 각각 환경의 표기에 있어서는 환경 (1)과 환경 (2)로 나타낸다. 환경 (1)과 환경 (2)의 차이는, 먼저 환경 (1)이 가정될 시에, 식 (11)에서 나타난 것과 같이 측정 거리 오차를 다룸으로써 측위 알고리즘의 성능이 개선될 수 있다. 또한 환경 (1)이 가정될 시에, 식 (14)에서 나타난 것과 같이 벽의 특성 정보의 정확한 값이 추정될 수 있다.

추가적으로 앞서 3.3 절에서 소개된 벽의 특성 정보 추정 기법의 적용에 대해서 설명한다. 먼저 4개의 앵커  $\{\hat{\mathbf{x}}_i\}_{i=1}^4$ 의 배치는, 순서대로  $(25, 0, 0)$ ,  $(0, 25, 0)$ ,  $(-25, 0, 0)$ ,  $(0, -25, 0)$ 로 위치시킨다. 이 때 앞서 정의된 앵커들의 순서쌍 집합  $A$ 는 아래와 같이 정의한다.

$$A = \{(1, 2), (1, 3), (1, 4), (2, 3)\} \quad (14)$$

이를 바탕으로 모든  $(i, j) \in A$ 에 대해서 식 (14)을 쓰면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} E[d_{1,2}] &= 25\sqrt{2} + \sqrt{2}l_1 + \sqrt{2}l_2 + E[n_N + n_M] \\ E[d_{1,3}] &= 50 + l_1 + l_3 + E[n_N + n_M] \\ E[d_{1,4}] &= 25\sqrt{2} + \sqrt{2}l_1 + \sqrt{2}l_4 + E[n_N + n_M] \\ E[d_{2,3}] &= 25\sqrt{2} + \sqrt{2}l_2 + \sqrt{2}l_3 + E[n_N + n_M] \end{aligned} \quad (15)$$

이 때, 식 (15)의 연립방정식을 풀면,  $\{l_k\}_{k=1}^4$ 을 얻을 수 있다. 만약 환경 (2)가 가정된다면, 식 (15)는 다음 식 (16)과 같이 쓰여지고 정확한  $\{l_k\}_{k=1}^4$  대신에  $\{\hat{l}_k\}_{k=1}^4$ 로 추정 값이 얻어진다.

$$\begin{aligned} E[d_{1,2}] &= 25\sqrt{2} + \sqrt{2}\hat{l}_1 + \sqrt{2}\hat{l}_2 \\ E[d_{1,3}] &= 50 + \hat{l}_1 + \hat{l}_3 \\ E[d_{1,4}] &= 25\sqrt{2} + \sqrt{2}\hat{l}_1 + \sqrt{2}\hat{l}_4 \\ E[d_{2,3}] &= 25\sqrt{2} + \sqrt{2}\hat{l}_2 + \sqrt{2}\hat{l}_3 \end{aligned} \quad (16)$$

측위 성능을 나타내기 위한 기준으로는 측위 정확도의 평균 제곱근 오차 (root mean square error)가 사용된다. 평균 제곱근 오차가 계산되기 위해서  $10^5$ 번의 반복 실험이 실행되는데, 각 실험마다 태그의 위치

를 벽으로 둘러싸인 지역에 임의로 위치시켜 진행된다. 본 모의실험에서 고려되는 반복 측위 알고리즘의 종류는 다음과 같다. 먼저 기존에 제안되었던 측위 알고리즘인 GN, LM, SD 알고리즘과 본 논문에서 제안되는 측위 기법이 GN, LM, SD 알고리즘에 각각 적용된 W-GN, W-LM, W-SD 알고리즘이다. 이 때 “W-”는 본 논문에서 제안하는 측위 기법이 적용되었음을 나타낸다. 본 모의실험에서는 모든 벽이  $x-z$  평면이나  $y-z$  평면에 평행하므로 3.2 절에서 살펴본 바와 같이 식 (6)-(10)이 직접적으로 레지듀얼, 비용 함수, 자코비안 행렬에 사용되어 측위 기법에 적용될 수 있다. 더불어 삼변 측량법 (Trilateration)의 측위 정확도도 함께 살펴본다.

먼저 표 1에서는 벽이 없는 환경이 고려된다. 벽이 없는 환경에서 환경 (1)과 환경 (2) 각각에 대해 GN, LM, SD 알고리즘, 삼변 측량법의 측위 정확도가 나타내진다. 벽이 없는 환경에서는 본 논문에서 제안된 측위 기법이 적용되어도 영향이 없기 때문에 표 1에서는 기존의 측위 알고리즘만 나타내졌다. 다음으로 표 2에서는 벽이 있는 환경이 고려된다. 벽이 있는 환경에서 환경 (1)과 환경 (2) 각각에 대해 GN, LM, SD, W-GN, W-LM, W-SD 알고리즘, 삼변 측량법의 측위 정확도가 나타내졌다. 표 1과 표 2의 결과를 바탕으로, 그림 3에서는 환경 (1) 하에서 벽이 없을 때 GN, LM, SD 알고리즘, 벽이 있을 때 GN, LM, SD 알고리즘, 벽이 있을 때 W-GN, W-LM, W-SD 알고리즘의 측위 정확도가 채널 별로 나타내졌다. 비슷하게 그림 4에서는 환경 (2) 하에서 벽이 없을 때 GN, LM, SD 알고리즘, 벽이 있을 때 GN, LM, SD 알고리즘, 벽이 있을 때 W-GN, W-LM, W-SD 알고리즘의 측위 정확도가 채널 별로 나타내졌다.

먼저 표 1, 표 2, 그림 3, 그림 4를 통해 가장 먼저 알 수 있으며 중요한 점은 본 논문에서 제안된 측위 기법의 적용 시에 벽으로 인한 측위 오차가 완벽하게 보상되고 도리어 벽이 없을 때의 기존의 측위 알고리즘보다 벽이 있을 때의 제안된 측위 알고리즘이 더 높은 측위 정확도를 보인다는 점이다. 구체적으로 설명하면 다음과 같다. 표 1의 측위 알고리즘의 성능과 표 2의 측위 알고리즘의 성능을 비교하여 관찰할 때, 벽이 존재하게 됨으로써 측위 알고리즘의 성능이 상당히 저하되는 것을 관찰할 수 있다. 하지만 표 1의 성능과 표 2에서 본 논문에서 제안한 기법을 적용한 측위 알고리즘 (W-GN, W-LM, W-SD 알고리즘)의 성능을 비교하여 관찰하면, 벽이 있더라도 본 논문에서

표 1. 벽이 없을 때 측위 알고리즘의 평균 제곱근 오차  
Table 1. RMSE of positioning algorithms without the walls

Positioning algorithm	Channel number				
	1	2	3	4	5
GN (1)	0.543	0.544	2.126	0.871	5.563
GN (2)	0.543	0.544	2.469	0.891	5.624
LM (1)	0.514	0.519	1.983	0.842	5.008
LM (2)	0.514	0.519	2.436	0.865	5.608
SD (1)	1.593	1.593	2.111	1.670	4.531
SD (2)	1.593	1.593	2.736	1.713	5.623
Trilateration (1)	1.337	1.342	8.775	3.265	15.690
Trilateration (2)	1.337	1.342	8.839	3.267	15.729

표 2. 벽이 있을 때 측위 알고리즘의 평균 제곱근 오차  
Table 2. RMSE of positioning algorithms with the walls

Positioning algorithm	Channel number				
	1	2	3	4	5
GN (1)	4.238	4.238	4.353	4.252	5.529
GN (2)	4.238	4.238	5.255	4.320	7.553
W-GN (1)	0.504	0.509	1.958	0.829	4.958
W-GN (2)	0.530	0.533	2.199	0.867	5.456
LM (1)	4.239	4.238	4.353	4.253	5.508
LM (2)	4.239	4.238	5.256	4.321	7.551
W-LM (1)	0.504	0.509	1.958	0.829	4.958
W-LM (2)	0.506	0.507	2.129	0.840	5.134
SD (1)	4.268	4.265	4.393	4.282	5.521
SD (2)	4.268	4.265	5.265	4.346	7.541
W-SD (1)	1.549	1.549	2.069	1.626	4.483
W-SD (2)	1.550	1.548	2.372	1.650	4.877
Trilateration (1)	1.951	1.957	9.027	3.589	15.735
Trilateration (2)	1.951	1.957	9.111	3.598	15.810

제안한 기법이 더 좋은 성능을 나타냄이 확인된다.

부가적으로 관찰 가능한 점은 다음과 같다. 먼저 LM 알고리즘이 가장 안정적인 측위 정확도를 갖고 SD 알고리즘은 측정 거리 오차의 바이어스가 작은 1, 2, 4번 채널에서는 다른 측위 알고리즘에 비해 낮은 성능을 갖는 반면 높은 바이어스를 갖는 3, 5번 채널에서는 가장 좋은 성능을 갖는 것을 관찰할 수 있다. 환경 (1)과 환경 (2)를 비교하였을 때, 측정 거리 오차의 바이어스가 거의 없는 1, 2, 4번 채널에서는 환경 (1)과 환경 (2)에서 측위 알고리즘이 거의 비슷한 성능을 갖는 반면 상대적으로 바이어스가 큰 3, 5

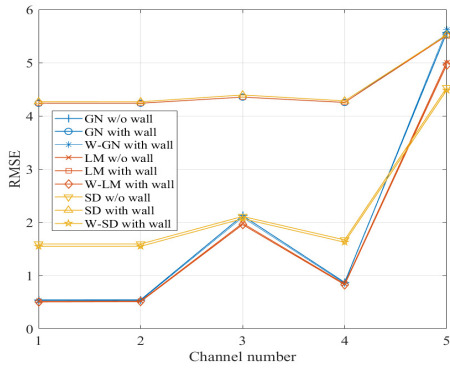


그림 3. 환경 1에서의 채널별 측위 알고리즘의 평균 제공근 오차  
Fig. 3. RMSE of positioning algorithms in environment (1)

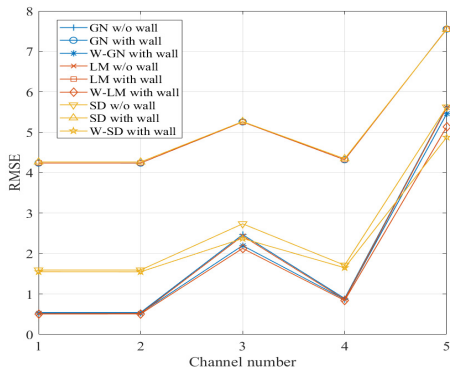


그림 4. 환경 2에서의 채널별 측위 알고리즘의 평균 제공근 오차  
Fig. 4. RMSE of positioning algorithms in environment (2)

번 채널에서는 환경 (1)에서의 측위 알고리즘이 더 좋은 측위 성능을 갖는 것이 확인된다.

#### IV. DoP 측면의 분석

DoP는 태그의 위치가 고정되어 있을 때 앵커 배치의 효율성을 의미할 수 있다. 따라서 임의로 배치된 태그의 위치에 따라 얻어진 DoP의 평균값은 앵커 배치의 효율성을 나타내는 기준으로 사용될 수 있다. 하지만 DoP 그대로는 본 논문에서 다루는 문제 및 제안된 측위 기법에 대해서는 적용될 수 없기 때문에 본 장에서는 벽을 고려하여 기존의 DoP를 변형한 W-DoP가 제안된다. 본 장에서는 W-DoP를 적용하여 제안된 측위 기법의 성능에 대해 분석하고자 한다.

#### 4.1 W-DoP 유도

기존 DoP 관련 연구<sup>[9]</sup>에서는 DoP를 유도하기 위해 유클리드 거리만을 고려하여 정의된 레지듀얼에 일차 근사가 적용된다. 이후, 앵커들의 측정 거리의 상관없음 (uncorrelation) 바탕으로, 비편향 추정에 대한 최선 선형 근사가 (best linear approximation on unbiased estimator) 적용된다. 결론적으로 DoP는 다음과 같이 유도된다.

$$\sqrt{\text{trace}((\mathcal{J}^T(\mathbf{x})\mathcal{J}(\mathbf{x}))^{-1})} \quad (17)$$

한편, W-DoP 유도는 앞선 3.2절에서 기존의 반복 측위 알고리즘이 개선된 방법과 비슷하게 개선되어 유도된다. 먼저 식 (5)와 같이 레지듀얼을 유클리드 거리뿐만 아니라 벽으로 인해 길어지는 길이가 포함되어 정의되고, 따라서 자코비안 행렬  $\mathcal{J}(\mathbf{x})$  대신 3.2절에 소개된  $\tilde{\mathcal{J}}(\mathbf{x})$ 가 식 (17)에 대입되어진다. 결론적으로 W-DoP는 아래와 같이 유도된다.

$$\sqrt{\text{trace}((\tilde{\mathcal{J}}^T(\mathbf{x})\tilde{\mathcal{J}}(\mathbf{x}))^{-1})} \quad (18)$$

#### 4.2 W-DoP를 통한 분석

먼저 3.4절의 모의실험에 대해서 DoP와 W-DoP의 평균값을 구하고자 한다. 이를 위해서  $10^5$ 번의 반복 실험이 실행되는데, 각 실험마다 태그의 위치를 벽으로 둘러싸인 지역에 임의로 위치시켜 DoP와 W-DoP가 계산되어 그 평균값이 얻어진다. 그 결과는 다음과 같다. 먼저 평균 DoP는 3.884의 값을 갖고 평균 W-DoP는 3.794의 값을 갖는다. 이 결과는 앞서 3.4절에서 벽이 있는 환경에서 본 측위 기법을 적용한 측위 알고리즘 (W-GN, W-LM, W-SD)이 벽이 없는 환경에서의 기존의 측위 알고리즘 (GN, LM, SD) 보다 높은 측위 정확도를 갖는 결과에 대한 DoP적인 설명을 나타낸다.

한편 3.4절의 모의실험과 같은 환경이지만 앵커의 위치 배치만 순서대로 (22,20,0), (-20,22,3), (-22,-20,0), (20,-22,3)로 배치된 환경이 고려된다. 이 때 평균 DoP는 3.272, 평균 W-DoP는 3.556의 값을 갖는다. 이 전의 모의실험과는 달리 W-DoP의 값이 더 높기 때문에 본 논문에서 제안된 측위 기법이 적용되더라도, 벽으로 인해 하락하는 측위 정확도가 완벽히 보상되지 못할 것이 예상된다. 표



표 3. LM, W-LM 알고리즘의 평균 제공근 오차  
Table 3. RMSE of LM algorithm and W-LM

Positioning algorithm	Channel number				
	1	2	3	4	5
LM w/o walls (1)	0.507	0.506	1.763	0.771	4.585
LM w/o walls (2)	0.507	0.506	2.173	0.815	5.077
LM with walls (1)	6.165	6.166	6.227	6.175	6.931
LM with walls (2)	6.157	6.158	6.852	6.212	8.581
W-LM with walls (1)	0.955	0.960	1.992	1.142	4.773
W-LM with walls (2)	0.959	0.960	2.325	1.172	5.137

3에서는 본 모의실험 환경 하에서 벽이 없을 때 LM 알고리즘/ 벽이 있을 때 LM 알고리즘/ 벽이 있을 때 W-LM 알고리즘의 성능이 나타내진다. 표 3을 관찰하면 표 1, 표 2와 다르게 본 논문에서 제안된 측위 기법이 적용되었음에도 벽이 없을 때의 측위 알고리즘보다 낮은 성능을 보인다. 이는 평균 DoP와 평균 W-DoP 값을 통해 예상된 바와 일치한다. 더 나아가, 평균 W-DoP가 평균 DoP보다 큰 값을 갖는다는 것은, 앵커들의 배치가, 본 논문에서 제안된 기법이 적용되더라도 벽으로 인한 측위 정확도의 보상이 완벽히 되지 않을 만큼, 벽에 대해 취약한 배치임을 의미한다. 이와 같은 맥락으로, 벽이 있을 때 측위 알고리즘 (LM with walls)의 측위 정확도가 표 2에 비해 표 3에서 낮음이 확인된다.

### V. 결 론

본 논문에서는, 많은 측위 알고리즘에서 일괄적으로 나타나는 벽과 같은 장애물로 인한 성능 하락에 대해 접근하였다. 벽이 고려된 측정 거리가 수학적으로 모델링되었으며 이를 바탕으로 한 간단하지만 탁월한 성능을 보이는 측위 기법이 제안되었다. 제안된 측위 기법은 측정 거리를 기반으로 하는 모든 측위 알고리즘에 적용될 수 있으며, 본 논문에서는 특별히 반복 측위 알고리즘에 적용되었다. 모의실험을 통해서, 제안된 기법의 적용 시에 벽으로 인해 하락하는 측위 정확도가 완벽히 보상될 수 있음이 확인되었다. 더 나아가, 본 논문에서는 W-DoP를 통해 제안된 기법의 성능이 분석되었고, W-DoP 와 DoP가 함께 사용될 때, 벽이 있는 상황에서 앵커 배치의 기준이 될 수 있음이 보여 졌다.

### References

- [1] S. Wang, J. Min, and B. Yi, "Location based services for mobiles: Technologies and standards" in *Proc. IEEE ICC 2008*, pp. 35-38, Beijing, China, May 2008.
- [2] X. Li, X. Zhang, X. Ren, M. Fritsche, J. Wickert, and H. Schuh, "Precise positioning with current multi-constellation global navigation satellite systems: GPS, GLONASS, Galileo and BeiDou," *Sci. Rep.*, vol. 5, no. 8328, 2015.
- [3] C. Choi, "Analysis of anti-jamming for GPS guided missile by GPS reception azimuth control," *J. KIICE*, vol. 20, no. 3, pp. 677-682, 2016.
- [4] J. Wang, "Pseudolite applications in positioning and navigation: progress and problems," *J. Glob. Position Syst.*, no. 1, pp. 48-56, 2002.
- [5] S. Sand, A. Dammann, and C. Mensing, *Positioning in Wireless Communication Systems*, John Wiley & Sons Ltd., 2014.
- [6] I. Sharp and K. Yu, "Enhanced least squares positioning algorithm for indoor positioning," *IEEE Trans. Mobile Comput.*, vol. 12, no. 8, pp. 1640-1650, Aug. 2013.
- [7] Decawave, *DW 1000 Datasheet(2015)*, Retrieved Aug. 20, 2019, from <http://www.decawave.com/sites/default/files/resources/dw-1000-datasheet-v2.09.pdf>.
- [8] A. F. Molisch, *IEEE 802.15.4a Channel Model-Final Report(2005)*, Retrieved Aug. 20, 2019, from <http://www.ieee802.org/15/pub/04/15-04-0662-02-004a-channel-model-final-report-r1.pdf>.
- [9] I. Sharp, K. Yu, and M. Hedley, "On the GDOP and accuracy for indoor positioning," *IEEE Tran. Aerospace and Electronic Syst.*, vol. 48, no. 3, pp. 2032-2051, 2012.

**안 진 현 (Jin-Hyun Ahn)**



2013년 8월 : 한국과학기술원 수리과학과 학사  
2016년 2월 : 한국과학기술원 수리과학과 석사  
2016년 3월~현재 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학부 박사과정

<관심분야> 통신공학, 기계학습, 정보이론  
[ORCID:0000-0002-1863-121X]

**설 등 민 (Dong-Min Seol)**



2005년 2월 : 숭실대학교 전자정보통신공학과 졸업  
2011년 8월 : 과학기술연합대학원대학교 광대역네트워크공학 박사  
2011년 8월~현재 : LIG넥스원 C4I연구소 수석연구원

<관심분야> 실내측위, 벽 투과 Radar, 통신공학  
[ORCID:0000-0002-1329-4875]

**강 준 혁 (Joonhyuk Kang)**



1991년 2월 : 서울대학교 제어계측공학 학사  
1993년 2월 : 서울대학교 제어계측공학 석사  
2002년 12월 : University of Texas at Austin 전기컴퓨터공학 박사

<관심분야> 통신 공학, 신호 처리, 물리 계층 보안, 무선 측위  
[ORCID:0000-0002-5508-3742]