

UWB 통신 시스템에서 향상된 첫 번째 피크 추정을 통한 거리 추정 성능 향상 연구

함도영*, 김성철^o

Improving Ranging Accuracy in Ultra-Wideband Time-of-Flight Systems by Enhanced Detection of the First Peak

Doyoung Ham*, Seong-Choel Kim^o

요약

본 논문에서는 초광대역(UWB) 통신 시스템에서 향상된 거리 추정 기법을 제안한다. UWB는 넓은 대역폭을 활용하여 타 시스템보다 정확한 거리 추정이 가능해 많이 연구되고 있는 분야이다. 송수신기의 시계 주파수 오프셋을 측정, 보정하기 위해서 거리 추정에는 3번의 전송이 쓰이는데, 이 세 번의 전송을 모두 활용하여 더 낮은 오차를 달성할 수 있다. 추정된 첫 번째 피크 셋 중 가장 일찍 도착한 경우를 실제 첫 번째 피크라고 추정하는 기법으로 향상된 거리 추정을 달성하였다. 첫 번째 피크를 놓쳤을 때에 발생하는 거리 편향 값을 보정하여 기존 기법(AltDS-TWR)의 0.71 m 오차보다 향상된 0.48 m 중앙값 오차를 달성하였다.

키워드 : 초광대역 통신, 거리 추정, 실내 측위

Key Words : UWB, Ranging, Indoor positioning

ABSTRACT

This paper proposes an enhanced range estimation technique in ultra-wideband (UWB) communication systems. UWB, by utilizing the wide bandwidth, allows more accurate range estimation than other communication-based ranging systems. To measure and correct for the clock offset of the transmitter and receiver, three transmissions are used for each ranging session. By utilizing all three transmissions, a lower ranging error can be achieved. The improved range estimation was achieved by assuming that the earliest arriving case among the three estimated first peaks is the actual first peak. By correcting the range bias value that occurs when the first peak is missed, an improved median error of 0.48 m was achieved, compared to the 0.71 m error of the conventional technique (AltDS-TWR).

※ This work was supported by Samsung Electronics Co., Ltd(IO230619-06510-02).

• First Author : Seoul National University Department of Computer and Electrical Engineering, wj2dy@maxwell.snu.ac.kr, 학생회원

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

논문번호 : 202310-095-C-RN, Received October 11, 2023; Revised November 21, 2023; Accepted November 29, 2023

I. 서론

최근 많은 연구들이 위치 기반 서비스를 위한 실내 측위를 고려하고 있다^[1]. 이는 자산 추적, 실내 내비게이션 시스템, 보안 등 다양한 분야에 활용 가능하다.

이 중 무선 통신을 이용하는 측위 기법들의 경우와 이파리와 블루투스 등을 이용해 1 미터 내외의 위치 추정 성능을 얻을 수 있다. 그러나, 초광대역(UWB) 통신의 경우 훨씬 넓은 대역폭을 이용하여 10 cm 정도의 오차를 보인다. 대역폭이 넓으면 다중경로 신호의 분해능이 향상되어 거리 추정 성능이 좋아지는 것으로 해석할 수 있다. 또한, UWB의 경우 전파를 활용하기 때문에 불투명한 물체로 LOS 경로가 가려진 경우에도 레이저 측정기 등과 달리 어느 정도 동작이 가능하다는 장점이 있다.

UWB를 활용하는 거리 측정 시스템의 핵심 부분 중 하나는 다중경로로 수신된 신호에서 첫 피크를 정확히 추정해야 한다는 점이다. 첫 피크를 놓쳐 5 ns 정도의 오차가 생긴다면 해당하는 거리 추정 오차는 1.5 m로 매우 큰 오차가 발생하게 된다. 본 논문에서 활용한 DW3000 UWB 모듈에서는 하드웨어 자체적으로 첫 피크를 추정하여 채널 임펄스 응답(CIR) 데이터와 함께 보고한다. 이 built-in 알고리즘은 LOS 상황에서는 잘 작동하지만, 심한 NLOS 환경에서는 첫 피크를 놓치는 등의 문제가 생긴다.

Raw CIR 데이터를 직접 활용할 수 있다는 점에 착안하여 많은 연구들이 CIR 데이터를 이용하여 UWB 거리 추정 성능을 향상시키려 하고 있다^[2,3]. 본 논문에서는 하나의 거리 추정 세션을 구성하는 세 CIR 데이터를 동시에 활용하여 첫 피크를 놓칠 확률을 낮추고 거리 추정 정확도를 향상시켰다.

2.1장과 2.2장에서는 각각 기존 기법과 제안 기법을 소개하였고, 3장에서는 실험 결과를 소개하였다.

II. 본론

2.1 기존 기법

가장 단순한 시스템에서는 장치 A가 신호를 송신하고, 장치 B가 이를 수신하는 경우를 생각할 수 있다. 전파 시간은 $\hat{t}_p = T_{RX} - T_{TX}$ 이고, 장치 간 거리는 $\hat{r} = c\hat{t}_p$ 로 계산 가능하다. (c 는 빛의 속도) 그러나 이 방식은 두 장치 A와 B의 시계가 동기화되어있어야 한다는 조건이 필요하다.

이 조건을 피하기 위해서는 양방향 통신을 생각해

볼 수 있다. 장치 A가 신호를 송신하고, 장치 B가 이 신호를 수신하고 나서 t_{replyB} 시간 동안 기다린 후에 다시 신호를 송신하고, 이 신호를 장치 A에서 수신하는 방식이다. 장치 A는 신호가 오가는 전체 시간(t_{roundA})을 측정한다. t_{replyB} 와 t_{roundA} 둘 다 하나의 시계에서 측정할 값이므로 장치 A와 B의 시계가 동기화되어있을 필요가 없다.

이 양방향 통신 기법에서는 시계의 주파수 오차에 의한 문제가 발생하게 된다. 모든 시계에는 주파수 오차가 있으며, RF 송수신기에서는 0.1-10 ppm (parts per million) 정도의 값이 일반적이다. 장치의 reply 시간이 대략 100 ms 정도의 값을 가지고 있고, 시계의 주파수 오차가 1 ppm이라면 측정값은 100 ns 정도의 오차를 보이게 된다. 빛의 속도를 곱해 거리로 환산하면 30 m에 해당하는 매우 큰 오차이다.

시계 주파수 오차의 효과를 보상하기 위하여 double-sided two-way ranging (DS-TWR)이 제안되었고, 2번의 송수신 대신 3번의 송수신을 활용하여 시계 주파수 오차를 계산하고 보정할 수 있다. 대칭 DS-TWR에서는 t_{replyA} 와 t_{replyB} 가 같을 것을 요구하며, 전파 시간은 아래 식에 의해 계산된다^[5].

$$\hat{t}_p = \frac{1}{4}(t_{roundA} - t_{replyB} + t_{roundB} - t_{replyA}) \quad (1)$$

AltDS-TWR^[4]에서는 t_{replyA} 와 t_{replyB} 에 서로 다른 값을 이용할 수 있으며, 전파 시간은 아래와 같이 계산된다.

$$\hat{t}_p = \frac{(t_{roundA}t_{roundB} - t_{replyA}t_{replyB})}{2(t_{roundA} + t_{replyA})} \quad (2)$$

2.2 제안 기법

송신 시간과 달리 수신 시간을 정확히 측정하는 것은 쉬운 문제가 아니다. 채널 임펄스 응답(CIR)에서 첫 번째 피크를 찾는 것이 핵심으로, 그림 1과 2에 이 문제가 나타나 있다.

그림 1의 경우는 line-of-sight (LOS) 피크가 크게 나타나 있어 상대적으로 첫 피크를 찾기가 쉬운 반면, 그림 2의 경우는 피크가 신호인지 잡음인지 구분하는 것이 쉽지 않다. LOS 피크를 놓치지 않는 것이 중요한데, 5 ns 시간 오차가 1.5 m의 큰 오차로 이어지기 때문이다.

제안 기법의 아이디어는 DS-TWR에서 세 번의 신호

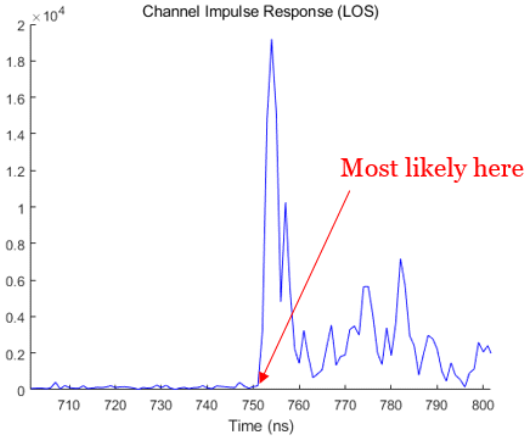


Fig. 1. Finding first peak in a CIR (easy)

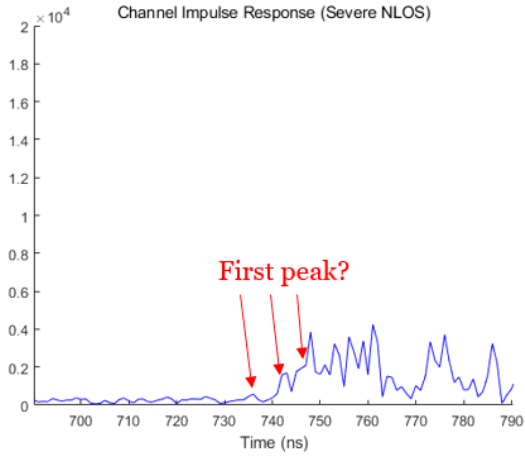


Fig. 2. Finding first peak in a CIR (hard)

를 송수신한다는 것에서부터 나온다. 첫 피크를 찾는 데에 세 개의 CIR을 모두 활용할 수 있다면 잘못 추정된 경우를 판정해낼 수 있다. 그림 3, 4, 5에 이 아이디어가 나타나 있다.

첫 번째와 세 번째 CIR(그림 3, 5)에서는 하드웨어에서 보고된 첫 피크가 실제 피크를 놓친 것을 확인할 수 있다. 두 번째 CIR(그림 4)의 값을 첫 번째와 세 번째 송수신에서도 활용할 수 있다면 성능 향상을 기대할 수 있다.

그림 6에 신호의 전파 경로가 그려져 있다. 위에서부터 먼저 장치 A가 신호를 송신하고, t_p (전파 시간) 동안 신호가 이동한 뒤, 장치 B가 신호를 수신하게 된다. 이때, 수신 신호의 첫 피크를 놓쳐 발생하는 오차를 b_1 으로 모델링하였다. 만약 첫 피크를 놓치지 않았다면 $b_1 = 0$ 이 되고, 놓쳤다면 $b_1 > 0$ 인 어떤 값이 될 것이

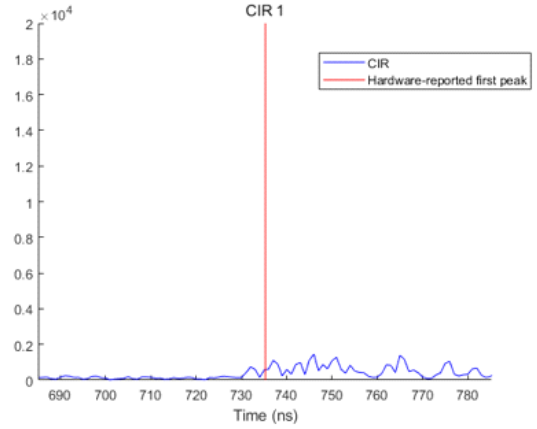


Fig. 3. Channel impulse response. Built-in algorithm missed the first peak.

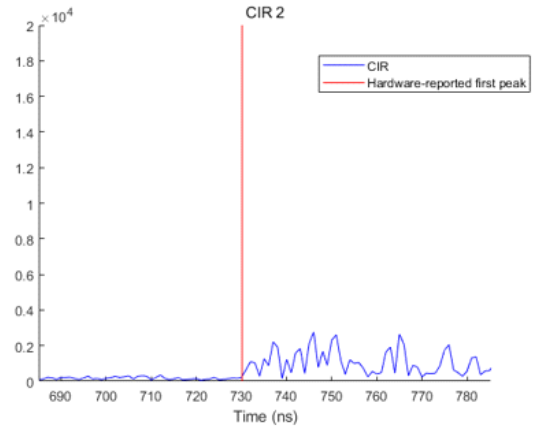


Fig. 4. Channel impulse response. Built-in algorithm correctly detected the first peak.

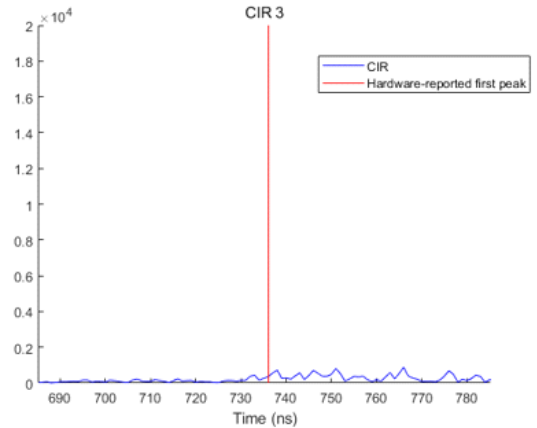


Fig. 5. Channel impulse response. Built-in algorithm missed the first peak.

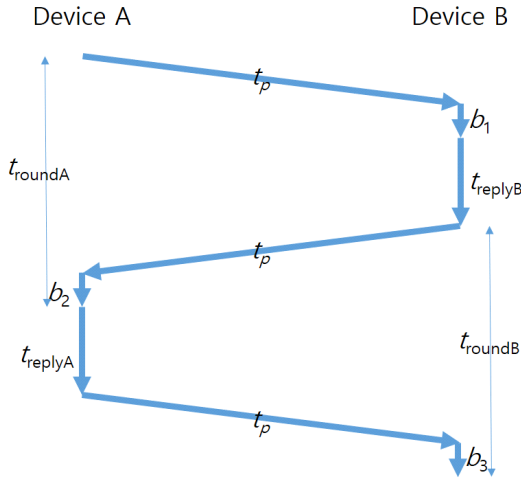


Fig. 6. Signal propagation diagram with three RX measurement biases.

다. 그 후, 장치 B는 (약속된) t_{replyB} 시간 동안 기다린 후에, 신호를 송신하게 된다. 장치 A에서도 마찬가지로 b_2 바이어스 값이 발생하고, t_{replyA} 시간 동안 기다린 후에 마지막 신호가 송신된다.

이처럼 신호의 송수신이 3번 발생하므로 수신 시간을 3번 측정하게 되는데, 이때 발생하는 오차를 b_1, b_2, b_3 로 놓으면 예를 들어 그림 3-5의 경우는 $b_1 \approx 5 \text{ ns}$, $b_2 = 0$, $b_3 \approx 5 \text{ ns}$ 가 된다.

그림 6에서 알 수 있듯 t_{roundA} 는 $b_1 + b_2$ 만큼, t_{roundB} 는 $b_2 + b_3$ 만큼 빼 주어야 실제 왕복 시간과 일치하게 된다.

$$t_{roundA}^{comp} = t_{roundA} - b_1 - b_2 \quad (3)$$

$$t_{roundB}^{comp} = t_{roundB} - b_2 - b_3 \quad (4)$$

식 2에 식 3, 4를 대입하여 아래의 식을 얻는다.

$$\hat{t}_{comp} = \frac{(t_{roundA}^{comp} t_{roundB}^{comp} - t_{replyA} t_{replyB})}{2(t_{roundA}^{comp} + t_{replyA})} \quad (5)$$

알고리즘 1에 제안하는 기법이 나타나 있다. 먼저 세 CIR값과 하드웨어에서 보고된 첫 피크 값을 모두 한 장치로 모으고(1번-2번 줄), 3, 4번 줄에서는 CIR 간의 correlation을 측정하여 CIR 간의 시간 오프셋을

Algorithm 1

- 1: $CIR_1, CIR_2, CIR_3 \leftarrow$ CIRs from the three received signals
- 2: $LDE_1, LDE_2, LDE_3 \leftarrow$ hardware-reported detected leading edges
- 3: $c_{offset1} = \text{argmax}(\text{correlation}(\text{abs}(CIR_1), \text{abs}(CIR_2)))$
- 4: $c_{offset2} = \text{argmax}(\text{correlation}(\text{abs}(CIR_1), \text{abs}(CIR_3)))$
- 5: $LDE_2 \leftarrow LDE_2 - c_{offset1}$
- 6: $LDE_3 \leftarrow LDE_3 - c_{offset2}$
- 7: $LDE_{min} \leftarrow \min(LDE_1, LDE_2, LDE_3)$
- 8: $b_i = LDE_i - LDE_{min} \quad (i = 1, 2, 3)$
9. Calculate \hat{t}_{comp} with equations (3), (4), (5)

구하였다. 그렇게 계산된 오프셋들($c_{offset1}, c_{offset2}$)을 첫 피크의 위치에서 빼주어 같은 위치로 동기화시켰다.(5-6번 줄) 제안 알고리즘의 주요한 contribution은 8번 라인으로, 세 leading edge(LDE)값 중 가장 앞에 오는 것을 진짜 첫 피크로 생각하여 나머지를 bias값으로 계산하는 것이다.

III. 실험

그림 7과 8에 실험 환경이 나타나 있다. 실험은 실내 환경에서 진행되었고, LOS 환경과 심한 NLOS 환경에서 각각 진행되었다. 그림 7에서는 두 UWB 모듈이 LOS 환경에 있음을 확인할 수 있다. 그림 8에서는 두 UWB 모듈은 같은 위치에 둔 채로 LOS 경로 상에 금속 의자나 물이 든 페트병 등을 배치하여 심한 NLOS 채널이 나오도록 구성하였다.

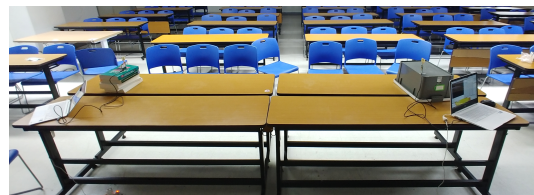


Fig. 7. Line-of-sight (LOS) environment

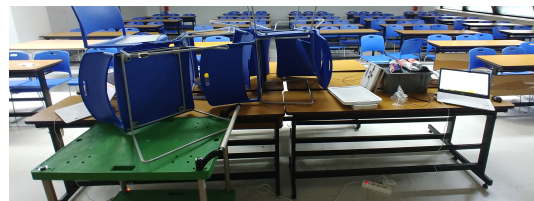


Fig. 8. Non-line-of-sight (NLOS) environment

그림 9와 10에는 두 모듈 간의 추정된 거리가 나타나 있다. 검은 선은 두 모듈 간의 실제 거리로, 두 모듈이 정지해 있으므로 실험 내내 같은 값을 유지하고 있다. 빨간 선은 기존의 거리 추정 알고리즘 (AltDS-TWR)이고, 파란 선은 제안 기법의 거리 추정 결과이다. LOS 케이스(그림 9)에서는 두 기법이 비슷하지만, NLOS 케이스(그림 10)에서는 제안 기법이 기존 기법보다 나은 성능을 보인다.

LOS 케이스(그림 9)에서는 기존 기법에 비해 제안 기법이 편향(bias)은 적으나 잡음이 더 많은 것을 확인할 수 있다. NLOS 케이스에서는 기존 기법이 첫 피크를 놓칠 때마다 최대 1m 가량의 큰 거리 추정 오차가 나타났다. 제안 기법의 경우 bias가 나타나려면 세 번의 측정 모듈이 첫 피크를 놓쳐야 하므로 심한 오차가 생길

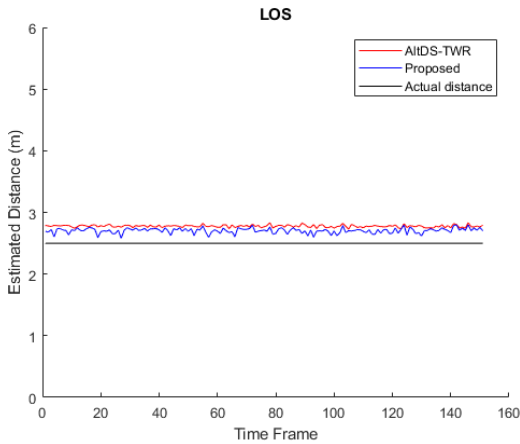


Fig. 9. Estimated distance according to time; LOS environment.

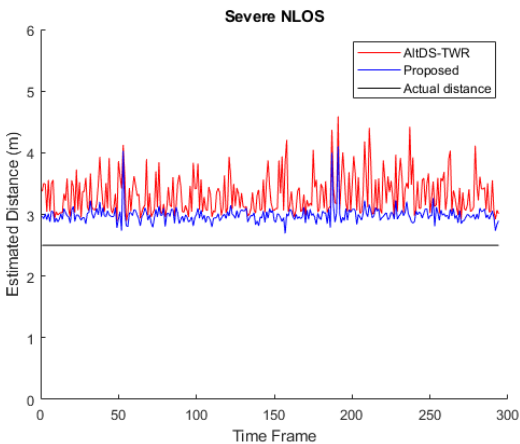


Fig. 10. Estimated distance according to time; severe NLOS environment.

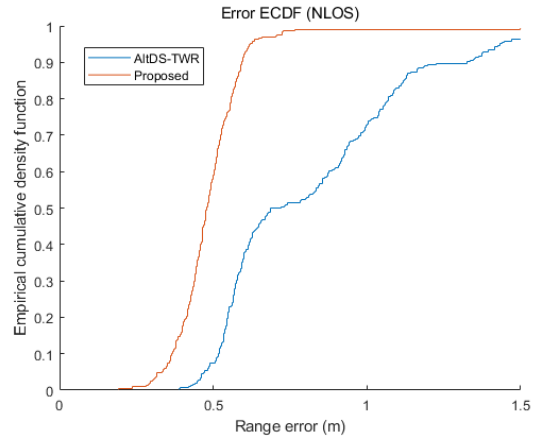


Fig. 11. Error ECDF for severe NLOS environment.

확률이 훨씬 적은 것을 확인할 수 있다.

그림 11에는 추정 오차의 경험적 CDF가 나타나 있다. x축이 오차, y축은 CDF를 나타낸다. 붉은 선(제안)은 푸른 선(기존)보다 왼쪽에 있으므로 더 적은 오차를 보임을 알 수 있다. 제안 기법은 중앙값 오차 0.48 m, 기존 기법은 중앙값 오차 0.71 m를 보인다.

IV. 결론

본 논문에서는 UWB 거리 추정 단계에서 활용 가능한 향상된 알고리즘을 제안하였다. 제안된 알고리즘은 심한 NLOS 환경에서 기존보다 훨씬 나은 성능을 보이는데, 신호 수신 시각의 편향을 보상이었기 때문이다.

제안 알고리즘의 단점으로는 CIR들을 한 장치에 모아야 한다는 점을 들 수 있다. CIR은 4 kB 정도로 꽤 큰 데이터라고 볼 수 있지만, 압축 기법을 통해 해결할 수 있을 것이다. 또, 그림 10에서 기존 기법보다 제안 기법의 잡음이 더 강했는데, NLOS 환경을 탐지[6]하여 제안 알고리즘을 선택적으로 적용함으로써 LOS 상황에서 잡음이 증가하는 현상을 막을 수 있으리라 생각한다.

References

[1] B.-H. Lee, D. Ham, J. Choi, S.-C. Kim, and Y.-H. Kim, "Genetic algorithm for path loss model selection in signal strength-based indoor localization," *IEEE Sensors J.*, vol. 21, no. 21, pp. 24285-24296, Nov. 2021. (<https://doi.org/10.1109/JSEN.2021.3110971>)

[2] M. Si, Y. Wang, H. Siljak, C. Seow, and H.

Yang, "A lightweight CIR-based CNN with MLP for NLOS/LOS identification in a UWB positioning system," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 27, no. 5, pp. 1332-1336, May 2023.

(<https://doi.org/10.1109/LCOMM.2023.3260953>)

- [3] V. Tran, Z. Dai, N. Trigoni, and A. Markham, "DeepCIR: Insights into CIR-based data-driven UWB error mitigation," *2022 IEEE/RSJ Int. Conf. IROS*, pp. 13300-13307, Kyoto, Japan, Oct. 2022.

(<https://doi.org/10.1109/IROS47612.2022.9981931>)

- [4] D. Neiryneck, E. Luk, and M. McLaughlin, "An alternative double-sided two-way ranging method," *2016 13th WPNC*, pp. 1-4, Bremen, Germany, Oct. 2016.

(<https://doi.org/10.1109/WPNC.2016.7822844>)

- [5] Part 15.4: *Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs), Amendment 1: Add Alternate PHYs*, IEEE Std. 802.15.4a, Aug. 2007.

(<https://doi.org/10.1109/IEEEESTD.2007.4299496>)

- [6] S. Kim, E. Lee, K.-M. Park, and S.-C. Kim, "Machine learning based NLOS identification for UWB with channel impulse response," *2022 KICS Winter Conf.*, Pyeongchang, South Korea, Feb. 2022.

함도영 (Doyoung Ham)



2018년 8월 : 서울대학교 전기·정보공학부 졸업

2018년 9월~현재 서대학교 전기·정보공학부 박사과정

<관심분야> 무선 통신, 측위, 딥러닝

[ORCID:0000-0001-5650-7175]

김성철 (Seong-Cheol Kim)



1984년 : 서울대학교 전기공학사

1987년 : 서울대학교 전기공학석사

1995년 : Polytechnic Institute of NYU, Brooklyn, NY, USA 전기공학 박사

1999년~현재 : 서울대학교 전기·정보공학부 교수

<관심분야> 무선 통신, 무선 측위, 차량용 레이더 신호처리

[ORCID:0000-0002-7896-5625]