

논문 2021-16-25

# BLE기반 비콘을 이용한 실내 환경에서의 사용자 위치추정 (Estimation of Human Location in Indoor Environment using BLE-based Beacon)

임수종, 성민관, 윤상석\*  
(Su-Jong Lim, Min-Gwan Sung, Sang-Seok Yun)

Abstract : In this paper, we propose a method for a mobile robot to estimate a specific location of a service provision target using a beacon-tag for the purpose of providing location-based services (LBS) to users in an indoor environment. To estimate the location, the irregular characteristics and error factors of the received signal strength indicator (RSSI) generated from the beacon are analyzed, and the distance conversion function is derived from the RSSI data extracted by applying a Gaussian filter. Then, the distance data converted from the plurality of beacons estimates an indoor location through a triangulation technique. After that, the improvement in the location estimation is analyzed by applying the temporal confidence reasoning technique. The possibility of providing a LBS of a mobile robot was confirmed through a location estimation experiment for a plurality of designated locations in an indoor environment.

Keywords : Indoor location estimation, Beacon, Received signal strength indication, Trilateration, Temporal confidence reasoning

## 1. 서론

최근, 이동로봇을 이용하여 호텔, 병원, 박물관, 쇼핑몰 등 실내 공간에서 사용자 위치 기반 서비스 (Location based service, LBS)를 제공하는 수요가 급증함에 따라 실내 측위와 관련한 RTLS (Real time location system)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다 [1]. 무엇보다도 실외 환경에서 주로 사용하고 있는 GPS를 실내 환경에 적용하기에는 여러 환경적 제약사항이 존재하기에 실내 환경에 적합한 LBS를 제공하기 위해 RFID (Radio frequency identification) [2], WLAN (Wireless local Area network) [3], UWB (Ultra wide band) [4], BLE (Bluetooth low energy) [5] 등 무선통신 기술을 이용한 위치추정이 필수적으로 동반되고 있다.

이 중에서도 UWB는 초 광대역 및 고 투과성으로 가장 높은 측위 정밀도를 가지지만 TDoA 방식의 특성상 시간 동기화 기기의 배포 문제와 간섭 민감도가 높은 편이다. 이에 반해, BLE 기술의 경우에는 1m 이하의 측위 정밀도 구현에 어려움이 존재하지만 저전력으로 다양한 장애물 조건 하에 장시간 유지되며 경제적 효용성을 가지는 실내 공간에 가장

적합한 무선기술로 평가되고 있다.

특히, BLE 비콘은 실내 환경 측위에 있어서 RSSI (Received signal strength indication) 방식으로 수신기의 위치를 결정하게 되며, 실내 환경의 다양한 잡음, 간섭 신호 등의 영향으로 불규칙적이며, 모듈 자체의 특성에 의해 측위에 높은 정확성을 확보하는 데 많은 제약사항이 따른다 [6, 7]. 따라서, 사용자 위치추정의 정확도 향상을 위해 RSSI의 불규칙적인 특성을 분석하고, 거리변환에 따른 적절한 전처리 과정과 측위 알고리즘을 적용하여 정밀도를 향상시키는 부분에 대한 연구를 필요로 한다.

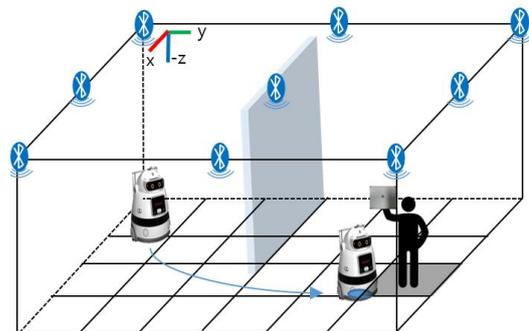


그림 1. BLE 비콘을 이용한 실내 환경 위치 기반 서비스의 개념도

Fig. 1. Conceptual diagram of location based service in indoor environment using BLE beacon

\*Corresponding Author (ssyun@silla.ac.kr)

Received: Aug. 26, 2021, Revised: Sep. 23, 2021, Accepted: Sep. 24, 2021.  
S.-J. Lim, M.-G. Sung: Silla University (M.S.)

S.-S. Yun: Silla University (Prof.)

※ 본 논문은 정부 (과학기술정보통신부)의 지원으로 한국연구재단의 지원 (No. NRF-2021R1F1A 1063669)과 2021년도 산업통상자원부 및 산업기술정책관리원 연구비 지원에 의한 연구임 (No. 20000515).

본 연구에서는 이동 로봇의 LBS를 지원하기 위해 복수의 BLE 비콘이 장착된 실내 환경에서 태그를 소지한 사용자의 RSSI 정보로부터 사용자의 위치를 추정하는 방법론을 제안한다 (그림 1 참조). 구체적으로, 위치추정 오차를 줄이기 위해 BLE 비콘에서 발생하는 RSSI값의 불규칙적인 특성 분석, 신호의 편차 보정을 위한 필터 적용, 선형회귀 모델을 이용한 거리정보 변환, 삼변측량 기법과 시간적 신뢰 추론 (Temporal confidence reasoning, TCR) 방법을 적용하여 태그를 가진 사용자의 위치추정 정밀도를 개선하고자 한다.

## II. 휴먼 위치 추정

### 1. 휴먼 위치 추정 프로세스

휴먼 위치 추정 프로세스는 실내 환경에서 이동로봇의 사용자 측위를 주목적으로 하고 있으며, 그림 2와 같이 전체 8가지의 흐름도로 구성된다.

구체적으로, 태그를 소지한 사용자는 복수의 BLE 비콘 모듈로부터 비콘 ID, RSSI 값을 수신하게 되며, 태그 ID를 포함하여 장거리 통신이 가능한 LoRa 통신에 의해 원거리의 게이트웨이로 데이터를 전송한다. 게이트웨이에 수신된 태그 ID를 기준으로 태그 ID 별 비콘 ID, RSSI값 등을 MQTT통신을 통해 서버로 전송하고, 수신된 데이터들은 7단계의 모듈 수행에 따라 실내 환경에 존재하는 휴먼의 위치를 추정하게 된다.

### 2. 무선 신호 전처리

태그는 BLE 비콘으로부터 거리에 따른 RSSI 값인 무선 신호 강도 값을 수신하게 되지만, 이 RSSI는 장애물의 의한 잡음, 신호 간섭 등의 영향으로 높은 신호왜곡의 특성을 가진다. 제안하는 위치 추정 프로세스에는 다수의 BLE 비콘을 사용하므로 신호의 간섭 영향을 최소화하기 위해 비콘 채널 사이를 특정 순서에 따라 이동하며 데이터를 분할 전송하는 주파수 도약 방법이 필수적으로 수행되어야 한다 [8]. 또한, BLE 비콘은 안테나 특성으로 인해 디바이스 포즈에 따른 신호감도의 차이를 발생시키는 특성도 가지고 있다. 따라서, RSSI 신호의 특성 분석으로부터 신호의 불규칙적인 편차를 최소화하기 위해 수신되는 데이터에 전처리 과정으로 가우시안 필터를 적용하여 보정하였다 [9, 10]. 하지만, RSSI 특성상 주변 장애물 환경, 디바이스의 위치 및 포즈에 의해 수신 강도의 변화가 민감하기 때문에, 가우시안 필터 적용에 따른 신호 값의 편차와 더불어 포즈 별 신호의 오차에 대한 특성 분석이 필요하다.

다음으로, 태그 별 다수의 BLE 비콘으로부터 수집된 RSSI 데이터는 측위를 위해 거리정보로 변환된다. 일반적으로 RSSI의 거리변환은 자유 공간에서 경로 손실을 구하기 위해 일반적으로 Friis 공식을 사용하지만, 실 환경에서는 다양한 요인

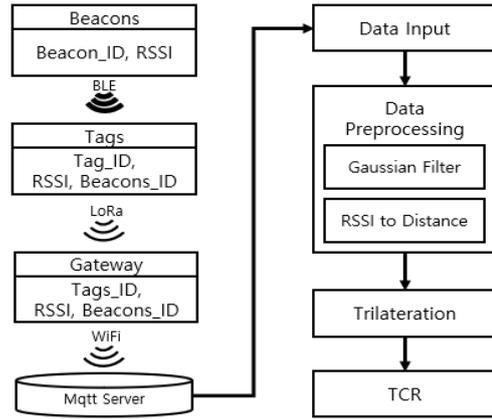


그림 2. 휴먼 위치 추정 흐름도

Fig. 2. Flow chart of human location estimation

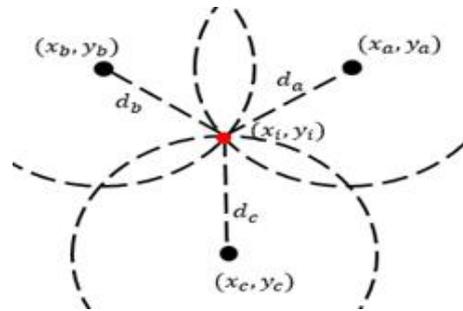


그림 3. 삼변측량 기법

Fig. 3. Trilateration technique

에 의해 오차가 발생하게 된다 [9]. 따라서, 제안하는 프로세스는 실제 환경에서 수집된 복수의 RSSI 데이터를 기반으로 회귀 분석을 통한 거리변환 함수를 적용하였다 [11, 12].

### 3. 삼변측량

삼변측량은 사용자의 위치를 추정하기 위해 3개 이상의 기준점과 그 거리정보를 사용한다. 그림 3에서 보는 바와 같이 최소 3개의 비콘과 임의의 위치로 추정되는 1개의 태그를 중심으로 3개의 원을 형성하게 된다. 여기서 원의 반지름  $d_a, d_b, d_c$  는 기준점 좌표를 알고 있는 각 비콘 (a,b,c)로부터 태그에 의해 수신되는 RSSI값을 거리변환 함수에 의해 추출되는 거리정보값을 지칭한다. 3개의 원이 겹치는 좌표  $(x_i, y_i)$  정보는 이 거리정보를 수식 (1)-(3)에 적용하여 연립 방정식의 해를 통해 구하게 된다. 구체적으로, 먼저 원 2개에 대한 교점이 연산되면 교점 정보 2곳의 좌표를 알게 되고, 나머지 1개의 원이 추가적으로 겹쳐지게 되면 최종적으로 1개의 교점 정보를 추출하는 원리이다 [13, 14].

$$d_a^2 = (x_i - x_a)^2 + (y_i - y_a)^2, \tag{1}$$

$$d_b^2 = (x_i - x_b)^2 + (y_i - y_b)^2, \tag{2}$$

$$d_c^2 = (x_i - x_c)^2 + (y_i - y_c)^2. \tag{3}$$

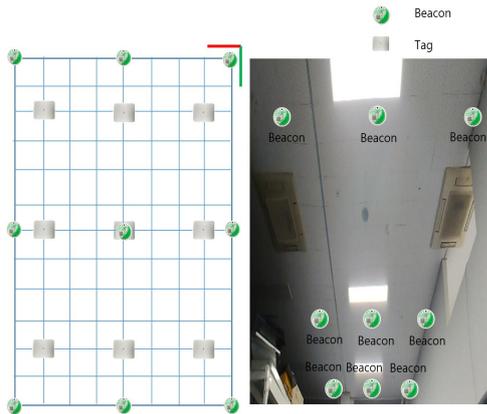


그림 4. 실내 환경에서의 위치 추정을 위한 실험 환경 구성  
Fig. 4. Experimental setup of location estimation in indoor environment

삼변측량을 통한 위치 추정에 있어서는, 태그에 대한 각 BLE 비콘의 거리변환 함수 값은 일정 영역 이내에 존재해야 한다. 그리고, 전처리 과정을 통하여 BLE 비콘의 불규칙적인 편차에 대한 보정은 가능하나, 최종 측위에는 여전히 비콘의 분포 위치를 포함하여 환경적인 요인에 따른 거리 오차의 유발요소가 존재한다.

4. 시간적 신뢰 추론

삼변측량을 통해 추정된 위치의 오차를 줄이고자 시간적 신뢰 추론 (Temporal Confidence Reasoning)의 후처리 방법을 사용한다. 이 방법은 삼변측량의 추정 위치에 시간에 따른 일정 범위 내의 연속성을 확인하여 신뢰도 범위 초과 여부에 따라 추정 위치에 대한 생성 혹은 삭제 여부를 결정하게 되며 그 구성은 다음과 같다.

$$\tau L = \min[\tau \in I(1 - X_L)^r \leq P]. \tag{4}$$

여기서  $P(=0.05)$ 는 신뢰도 수준을 나타낸다 [15, 16].

우선, 초기 삼변측량의 추정된 위치  $L$ 의 정확도에 대한 평균을  $X_L$ 이라고 가정하면,  $(1 - X_L)$ 은 부정확도인 오인식률을 의미한다. 이로부터  $(1 - X_L)\tau L$ 는 연속적인 인식 상황에서의 인식 결과  $\tau L$ 가 모두 오인식으로 추정 했을 경우 확률로 정의하기 위해 계산될 수 있는 값이다. 여기서,  $\tau$ 는 동일 인식결과에 대한 연속인식의 횟수를 나타낸다. 따라서, 오인식의 확률  $(1 - X_L)\tau L$ 의 결과 값이 5% 이내로 수렴하면 그 인식기의 신뢰도 수준이 95%이상을 나타내는 것으로 추론할 수 있다.

예를 들면, 평균 정확도  $L$ 의 정확도가 80%를 나타내면 오인식률은 20% (0.2)가된다. 여기에서, 2회 연속 오인식을 나타낼 확률은 4% (0.04)이내가 되며 이는 95%의 인식 신뢰도에 수렴함을 의미한다. 따라서 최종 위치는 연속적인 3번

의 일정 범위 내에 위치로부터 신뢰 수준을 만족하는 결과를 도출하게 된다.

III. 실험 구성 및 결과

1. 실험 구성

다수의 BLE 비콘과 태그를 이용한 위치 추정 실험을 위한 환경구성은 그림 4와 같다.

구성된 BLE 비콘의 장애물 간섭을 최소화하기 위해 실내 공간 (W6.0m×D4.0m×H2.65m) 천정에 총 9개의 BLE 비콘을 설치하였고, 지상 임의의 지정된 위치에 태그를 배치하고 RSSI 값 측정을 통한 포즈별 특성 분석 및 위치 추정 실험을 수행하였다.

2. 위치추정 실험 결과

먼저, 태그의 특정 포즈에 따른 안테나의 방위각마다 무선 신호의 감도, 감쇄 및 오차에 대한 영향을 테스트하기 위해, 천장에 장착한 BLE 비콘 모듈에 태그 안테나 방향을 90도 간격으로 회전하면서 거리 별 RSSI 값을 측정하였고, 그

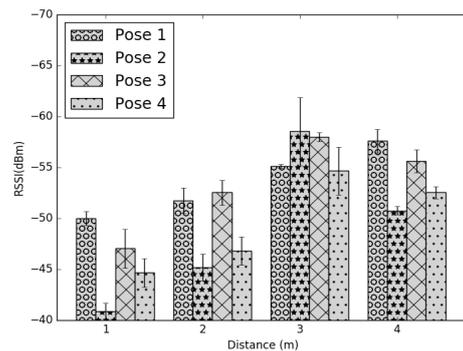


그림 5. 태그 포즈에 따른 RSSI 신호 측정 결과  
Fig. 5. Measurement result of RSSI signal for each tag posture

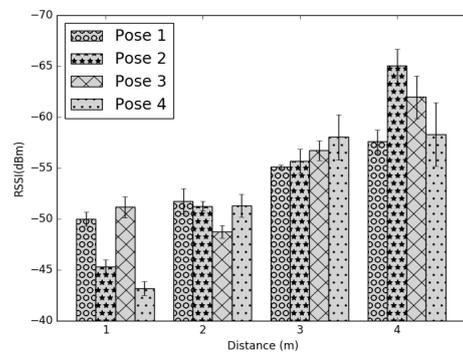


그림 6. 비콘 포즈에 따른 RSSI 신호 측정 결과  
Fig. 6. Measurement result of RSSI signal for each beacon posture

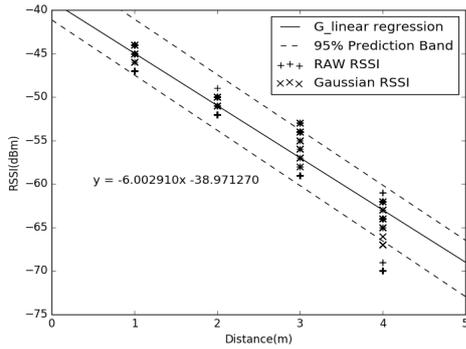


그림 7. RSSI 신호 별 거리 변환 결과

Fig. 7. Distance conversion result for each RSSI signal

분석 결과는 그림 5와 같다. 태그의 안테나 방향이 비콘을 지향하는 Pose 1은 거리별 RSSI 값이 선형 비례하면서 낮은 표준편차를 보이고 있다. 나머지 Pose에서는 상대적으로 편차가 높고, 원거리에서 거리별 선형성의 왜곡이 발생함을 확인하였다.

다음으로, 태그는 Pose 1으로 유지한 채 천장에 장착한 BLE 비콘의 안테나 방향을 90도 간격으로 회전하면서 거리별 RSSI 값을 측정하였고, 그 분석 결과는 그림 6과 같다.

태그 Pose 1에 대한 비콘 Pose 1은 RSSI 값이 거리에 따라 선형 비례하며 표준편차도 적은 수치를 보이고 있다. 나머지 경우에는 상대적으로 편차가 크며, 원거리에서 거리별 선형성의 왜곡이 크게 증가함을 확인하였다.

비콘과 태그의 포즈 특성을 분석한 후 편차가 낮으며 선형성을 유지하는 포즈를 설정하여 거리 별 RSSI 값을 측정하였고, 가우시안 함수를 사용하여 필터링 된 RSSI 값을 그림 7와 같이 선형 함수로 도출하였다.

그림 8은 태그의 각 위치 별 비콘 데이터 60개를 추출한 후, 삼변측량을 통해 추정되는 위치의 결과이다.

BLE 비콘의 특성상 주파수 도약에 의한 RSSI의 불규칙적인 편차를 가우시안 함수로 줄였으나, 삼변측량의 최종 측위에서 각 BLE 비콘 위치와 포즈, 구조적인 배치에 따라 큰 편차를 나타내는 경우가 발생하기도 하였다.

대표적으로 지정 위치 (0.5, 3.0), (2.0, 3.0), (3.5, 3.0)의 경우에는 삼변측량에 사용된 9개의 비콘 중 가장 가까운 3 곳의 비콘 거리 정보와 태그 좌표를 이용하여 그 위치를 추정하는데, 다른 비콘에서 가까운 거리값을 표시하게 되거나, 선정된 비콘에서 거리 변화값이 증가하게 되면 결과적으로 표준편차가 크게 증가하는 현상을 확인하였다.

다음으로, 삼변측량에 TCR 방법을 적용하여 추정된 위치 분포와 그렇지 않은 위치분포의 비교를 통하여 그 개선정도를 표 1에 표시하였다.

그림 8과 표 1의 분석 결과, 태그 위치 (2.0, 4.5)에서 삼변측량 위치추정 값이 근거리 이내의 연속성 없이 큰 편차를 가질 경우 TCR의 신뢰도 수렴을 충족하지 못하고 제거

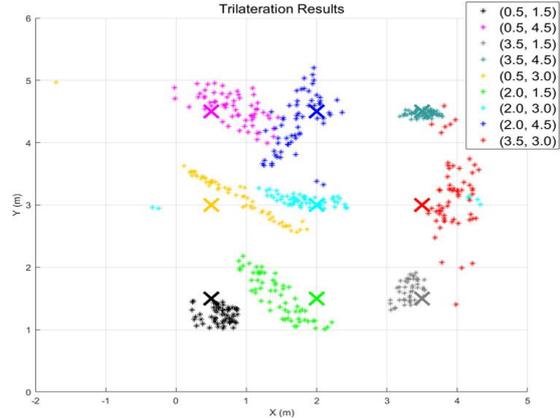


그림 8. 삼변측량 위치 추정 실험결과

Fig. 8. Experimental result of trilateration location estimation for a designated point

표 1. 시간적 신뢰 추론에 따른 위치 오차 비교

Table 1. Comparison of positioning errors according to the TCR

Location (x, y)[m]	Without TCR $\mu \pm \sigma$ [m]	With TCR $\mu \pm \sigma$ [m]	Improvement rate(%)
0.5, 1.5	0.342±0.116	0.318±0.088	7.02
0.5, 4.5	0.477±0.218	0.419±0.191	12.15
3.5, 1.5	0.284±0.114	0.266±0.110	6.34
3.5, 4.5	0.146±0.072	0.128±0.061	12.32
0.5, 3.0	0.689±0.425	0.665±0.305	3.48
2.0, 1.5	0.684±0.270	0.662±0.254	3.22
2.0, 3.0	0.515±0.600	0.316±0.172	38.64
2.0, 4.5	0.529±0.302	0.403±0.271	23.82
3.5, 3.0	0.668±0.336	0.546±0.230	18.26

됨으로써 위치추정 정밀도가 개선됨을 확인하였다. 특히, 태그 위치 (2.0, 3.0)에서의 위치 추정값을 살펴 보면, 3가지 다른 위치의 영역으로 형성되지만, TCR의 후처리를 통하여 수렴되는 위치추정의 결과값이 38.64% 개선됨을 검증하였다. 하지만, 태그 위치 (0.5, 3.0)과 (2.0, 0.5)의 경우에는 일정방향으로 연속성을 가지며 그 편차가 점점 확대되는 경우에는 TCR에 대한 개선정도가 높지 않음을 확인할 수 있다.

최종적으로, 삼변측량에 TCR의 후처리를 수행하였을 때 위치 추정에 대한 개선정도가 평균 13.91% 증가함을 확인하였다.

#### IV. 결론

본 논문에서는 실내환경에서 이동 로봇의 위치기반 서비스 제공을 위해 비콘-태그를 이용하여 휴먼 위치를 추정하는 방법론을 제안하였다. 잡음과 간섭신호에 영향을 받는 BLE 비콘의 특성에 대하여 비콘과 태그의 안테나 방향에 따른 감도의 정도를 분석하였고, 포즈에 따른 특성을 반영하고, 가우시안 필터의 적용을 통하여 RSSI의 오차를 개선할 수 있도록 하였다. 그리고, BLE 비콘과 태그 간 RSSI 값을

선형회귀 분석으로 거리함수를 도출하여 불규칙한 RSSI 편차를 보정하고자 하였다. 도출된 거리정보를 삼변측량 기법에 적용하여 공간 내 태그의 최종 위치를 추정하고, TCR의 후처리 과정을 통해 위치 추정 오차의 개선효과를 확인하였다.

하지만, 실질적으로 이동로봇이 LBS를 제공하기 위해서는 사용자의 동적상황에 대한 고려가 있어야 한다. 추후 연구에서는 동적 환경에서 태그의 위치를 실시간으로 추적하는 방법과 비콘-태그의 방향성을 상쇄함과 동시에 구조적인 배치로 위치오차를 개선할 수 있는 연구를 진행할 계획이다.

## References

- [1] H. Choi, J. Park, Y. Moon, "Ubiquitous Sensor Network Based Localization System for Public Guide Robot," *Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering*, Vol. 10, No. 10, pp. 1920-1926, 2006 (in Korean).
- [2] W. Kim, "A Mobile Robot System Based on RFID Environment," *The Journal of Korean Institute of Information Technology*, Vol. 5, No. 4, pp. 25-30, 2007 (in Korean).
- [3] A.S. Kim, J.G. Park, J.G. Hwang, "Enhanced Indoor Positioning Algorithm Using WLAN RSSI Measurements Considering the Relative Position Information of AP Configuration," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, Vol. 19, No. 2, pp. 146-151, 2013 (in Korean).
- [4] J. Seo, Y.H. Jeong, Y.J. Bae, H.S. Yoo, Y.D Kim, D.K Kim, "Development of UWB-based Indoor Positioning System for Robot Tracking," *The Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences*, Vol. 44, No. 4, pp. 701-708, 2019 (in Korean).
- [5] J.N. Lee, H.Y. Kang, Y.T. Shin, J.B. Kim, "Indoor Positioning Algorithm Combining Bluetooth low Energy Plate with Pedestrian Dead Reckoning," *Journal of Korea Institute of Information and Communication Engineering*, Vol. 22, No. 2, pp. 302-313, 2018 (in Korean).
- [6] J.H. Park, J.P. Lee, Y.U. Yun, D.H. An, Y.O. Kim, "A Study on the Signal Analysis of BLE Beacon According to the Environment," In *Proceedings of Symposium of the Korean Institute of communications and Information Sciences*, Vol. 60, No. 01, pp. 1462-1463, 2016 (in Korean).
- [7] C.P. Yoon, C.G. Hwang, "Efficient Indoor Positioning Systems for Indoor Location-based Service Provider," *Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering*, Vol. 19, No. 6, pp. 1368-1373, 2017 (in Korean).
- [8] H.S. Cho, "A Study on Interference Cancellation of Adaptive Frequency Hopping System," *Journal of Korea Institute of Information, Electronics, and Communication Technology*, Vol. 10, No. 5, pp. 396-401, 2017 (in Korean).
- [9] J.G. Lee, Y.D Kim, Y.W Ko, "Filter Algorithm for Accurate Measurement of the RSSI Value of BLE Beacon," *Proceedings of the Korean Information Science Society Conference*, Vol. 42, No. 01, pp. 1871-1873, 2015 (in Korean).
- [10] M.H. Kim, B.K. Kim, Y.W. Ko, K.S. Bang, "Indoor Location Tracking System of Low Energy Beacon Using Gaussian Filter," *The Journal of Korean Institute of Information Technology*, Vol. 14, No. 6, pp. 67-74, 2016 (in Korean).
- [11] M.G. Seong, S.S. Yun, "Estimation of Interior Location Using Regression Analysis of Beacon," In *Proceedings of the Fall Conference of the Busan, Ulsan, Gyeongnam Branch of the Korea Society of Automotive Engineers*, pp. 26-27, 2020 (in Korean).
- [12] H.G. Jeong, T.H. Park, J.W. Kwon, "A Study on Improvement of Indoor Positioning Accuracy Using Diagonal Survey Method," *The Journal of the Korea Institute of Intelligent Transport Systems*, Vol. 17, No. 5, pp. 160-172, 2018.
- [13] S.G. Kim, T.H. Kim, S.W. Tak, "Performance Evaluation of RSSI-based Trilateration Localization Methods," *Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering*, Vol. 15, No. 11, pp. 2488-2492, 2011 (in Korean).
- [14] B.S. Lee, S.W. Kim, "A Study on Self-Localization of Home Wellness Robot Using Collaboration of Trilateration and Triangulation," *Journal of IKEEE* Vol. 18, No. 1, pp. 57-63, 2014 (in Korean).
- [15] G.H. Lim, C.H. Yi, I.H. Suh, S.W. Hong, "Robust Semantic World Modeling by Beta Measurement Likelihood in a Dynamic Indoor Environment," In *Proceedings of the International Conference on Knowledge Engineering and Ontology Development*, pp. 311-316, 2011.
- [16] S.S. Yun, M.S. Kim, M.T. Choi, J.B. Song, "Interaction Intent Analysis of Multiple Persons Using Nonverbal Behavior Features," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, Vol. 19, No. 8, pp. 738-744, 2013 (in Korean).

**Su-Jong Lim (임수종)**

2020 Electrical Engineering from Silla University (B.S.)

2020~Fusion Engineering from Silla University (M.S.)

Field of Interests: Intelligent robot system, indoor positioning, Location Based Service

Email: waterbell75@gmail.com

**Sang-Seok Yun (윤상석)**

2013 Mechanical Engineering from Korea University (Ph.D.)

2017~Mechanical Convergence Engineering from Silla University (Prof.)

Field of Interests: Cognitive control system, human-robot interaction, and socially assistive robots

Email: ssyun@silla.ac.kr

**Min-Gwan Sung (성민관)**

2020 Electrical Engineering from Silla University (B.S.)

2020~Fusion Engineering from Silla University (M.S.)

Field of Interests: Indoor positioning, signal processing

Email: sungmingwan@naver.com