

실내 환경에서의 효율적인 Fingerprinting Database 구축을 위한 RF 신호 세기 분포 모델링

이정호¹, 김태훈¹, 신범주¹, 유창수¹, 경한결¹, 이택진^{1,2*}

¹한국과학기술연구원 안전증강융합연구단, ²TJ Labs Corp.

본 논문에서는 빠르고 효율적인 fingerprinting database 구축을 위한 실내 공간에 대한 RF 신호의 received signal strength (RSS) 분포 모델링 기법을 제안한다. 실내 모든 공간에 대한 RSS database를 제작하는 것은 현장에서의 직접적인 데이터 수집으로 인하여 높은 비용 및 인력 자원을 요구한다. 이를 해결하고자, RF 신호에 대한 path loss 모델을 적용하여 실내 공간에 대한 가상의 RSS 분포를 모델링하고자 한다. 제안 기술은 기둥, 벽, 그리고 문과 같은 장애물 정보가 반영된 digital map을 활용하여, RF 신호원으로부터 실내 각각의 위치까지 a star 알고리즘을 활용하여 RF 신호가 전파될 수 있는 최적 경로를 산출한다. 경로 산출을 위하여, 기둥, 벽, 그리고 문이 존재하는 위치에 대해서는 높은 cost 값이 정의되며, 이외 보행이 가능한 모든 위치에는 낮은 cost 값이 정의된다. 즉, RF 신호가 전파되는 경로 중, 가장 낮은 전파 cost를 갖는 경로를 선택하며, 해당 경로에 대한 path loss 모델을 적용하여 각 위치 별로 RSS 값을 산출한다. 제안 기술은 전파 cost의 합계에 대한 임계치 설정을 통해 신호 음영 지역에 대한 계산을 줄인다. 제안 기술을 통해 매우 쉽고 빠르게 실내 RSS 패턴을 가상으로 확인할 수 있지만, 수많은 장애물이 존재하는 실내 환경에서 fingerprinting database로 활용하기에는 그 정확도가 떨어진다. 이를 보완하기 위하여, 제안 기술은 극히 일부 영역에서 실제 측정된 RSS 측정치를 기반으로 주변 영역에 대한 가상의 RSS 패턴을 보정한다. 제안 기술의 성능 검증을 위하여, 홀 및 복도가 포함된 실내 공간에서 9개의 Bluetooth beacon을 설치하여 테스트를 수행하였다. 실제 측정치에 대한 가상의 RSS 분포 오차는 평균 8.1 dBm이다. 일부 구간에서의 수집 데이터를 활용하여 가상의 RSS 분포를 보정했을 때는 평균 4.9 dBm 오차를 나타내었다. 이러한 결과를 통하여, 제안 기술을 통하여 실내 전체 영역에 걸쳐 높은 측위 정확도 제공을 위한 RF 신호원 배치를 가상으로 확인할 수 있을 뿐만 아니라, 빠르고 정확하게 fingerprinting database를 구축할 수 있음을 증명하였다.

RF Signal Strength Modeling for Efficient Fingerprinting Database Construction in Indoor Environment

Jung Ho Lee¹, Taehun Kim¹, Beomju Shin¹, Changsu Yu¹, Hankyeol Kyung¹, Taikjin Lee^{1,2*}

¹Augmented Safety System with Intelligence Sensing & Tracking, Korea Institute of Science and Technology

²TJ Labs Corp.

This paper presents a method to model the received signal strength (RSS) distribution of RF signals indoors for fast and efficient fingerprinting database construction. Building an RSS database for all indoor spaces is costly and labor intensive as data collection must be done directly on site. To solve this problem, we apply a path loss model to the RF signal to model the virtual RSS distribution indoors. The proposed algorithm utilizes a digital map that reflects information about obstacles such as pillars, walls, and doors. Based on this, from the RF signal source to each location in the room, an a-star algorithm is used to calculate the optimal path through which the RF signal can propagate. For path calculation, high cost values are defined for locations where pillars, walls, and doors exist, and low cost values are defined for all other locations where walking is possible. That is, the proposed algorithm selects a path with the lowest propagation cost among paths through which an RF signal is propagated, and calculates the RSS value for each location by applying a path loss model. In particular, the proposed algorithm reduces the calculation of the signal shadow area by setting a threshold for the sum of the propagation costs. It is possible to check the indoor RSS pattern very easily and quickly through the proposed algorithm, but the accuracy is low to be used as a fingerprinting database in an indoor space with many obstacles. To compensate this, the proposed algorithm corrects the virtual RSS pattern for the surrounding area based on the RSS measurements actually measured along the short walking path. To verify the performance of the proposed algorithm, we installed nine Bluetooth beacons and conducted tests in an indoor space including halls and corridors. The virtual RSS distribution error for real measurements averaged 8.1 dBm. An average error of 4.9 dBm was shown after the virtual RSS distribution was corrected by using the collected data in some sections. Through these results, we proved that the proposed algorithm can virtually confirm the arrangement of RF signal sources to provide high localization accuracy over the entire indoor area, as well as quickly and accurately build a fingerprinting database.

Keywords: RF, simulation, fingerprinting, database

1. 서론

실외 공간에서의 global navigation satellite system (GNSS)의 활용으로 다양한 서비스가 제공되고 있는

반면, 실내 공간에서는 측위 기술의 정확도 문제로 인하여 아직 서비스 제공이 원활하지 못한 문제가 있다. 다양한 RF 신호를 활용하여, 실내 공간에서 위치 정보를 제공하고자 하지만, 신호 잡음, 왜곡 및 multipath 등의 문제는 실내 측위 기술에서의 가장 큰 문제점으로 지적된다 (Huy & Cheolkeun 2014). RF 신호 활용 실내 측위 기술 중, fingerprinting 기술은 실내 공간에 대한 radio map을 활용하여 위치를 산출하기 때문에 실내 장애물에 비교적 강인한 장점을 갖는다 (Lee et al. 2020). 하지만, 실내 모든 공간에 대하여 직접 RF 데이터를 수집하고, 이를 데이터베이스로 구축하여야 하기 때문에 인적 및 비용이 크게 소요되는 단점이 있다 (Suroso et al. 2022). 본 논문에서의 제안 기술은 실내 공간에 대한 radio map을 쉽고 빠르게 구축하기 위하여, RF 신호의 예상 전파 경로를 산출하고 이에 신호 감쇄 모델을 적용함으로써 실내 공간에 대한 가상의 RSS 분포를 생성한다. 특히, 매우 짧은 보행 구간에서 측정된 RSS 값을 활용하여 가상의 RSS 분포를 보정함으로써, fingerprinting 기반 측위 기술의 정확도를 향상시킨다. 제안 기술은 실내 공간에 대한 RSS 분포를 가상으로 생성하기 위하여, 기둥, 벽, 그리고 출입문 등의 장애물의 위치가 포함된 digital map을 활용한다. 각 장애물은 신호의 전파 경로 산출을 위하여 digital map에 propagation cost로 표기된다. 제안 기술은 Propagation cost를 기준으로 산출된 신호 전파 경로 상에서 거리에 따른 신호 감쇄 모델을 적용함으로써 가상의 RSS 분포를 생성한다. 가상의 RSS 분포 확인을 통하여, 실제 fingerprinting database 구축 전에 RF 신호원 배치에 따른 coverage 확인을 수행할 수 있다. 이는 정확한 database 구축을 위한 신호원 배치, RSS 데이터 수집, coverage 확인 및 측위 성능 확인의 과정을 불필요하게 반복하지 않도록 도움을 준다. 또한, 직접적인 데이터 수집 과정을 줄여 빠르고 정확한 fingerprinting database 구축이 가능하게 한다.

2. 제안 기술

2.1 신호 전파 경로 산출

제안 기술은 빠르게 가상의 RSS 분포를 생성하기 위하여 기둥, 벽, 그리고 출입문 등의 장애물만을 고려한다. 각 장애물은 신호 전파 경로 산출을 위하여, Fig. 1과 같이 digital map 상에서 propagation cost로 정의된다. Digital map 상에서 RF 신호원의 좌표가 지정되면, 벽을 제외한 모든 위치로의 신호 전파 경로 산출을 수행한다. 제안 기술은 경로 산출을 위해, heuristic 추정 값을 활용하여 출발 지점으로부터 목표 지점까지 최단 경로를 판단하는 a-star를 활용한다. 여기서, 출발 지점은 RF 신호원의 위치이고 목표 지점은 벽을 제외한 실내 모든 위치이다. Heuristic 추정 값은 식 (1, 2)로 정의한다.

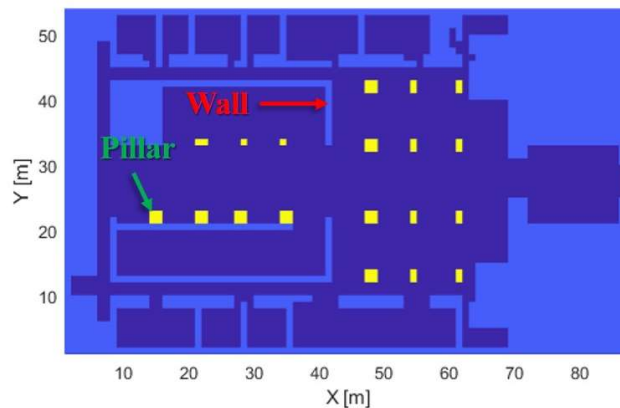


Fig. 1. Digital map with obstacles in a test site.

$$F = G + H \quad (1)$$

$$H = \sqrt{(x_s - x_d)^2 + (y_s - y_d)^2} \quad (2)$$

여기서, F 는 목적지까지 예상되는 propagation cost 합이며, G 는 목적지부터 현 지점까지 선택된 propagation cost의 합이다. H 는 현 지점(x_s, y_s)으로부터 목표 지점(x_d, y_d)까지의 직선거리를 의미한다. 즉, RF 신호원으로부터 각 지점까지 propagation cost의 합을 최소화하는 경로가 최종 신호 전파 경로로 선정되며, 이 경로 상에 식 (3)의 거리에 따른 path loss 모델을 적용함으로써 RSS 값을 산출한다. 벽을 제외한 실내 모든 지점에 대하여 위의 과정을 반복함으로써 RSS 분포가 생성된다.

$$\begin{aligned}
 RSS &= -10 \cdot n_1 \cdot \log(d) + RSS_0 && \text{if } d \leq d_{bp} \\
 RSS &= -10 \cdot n_1 \cdot \log(d_{bp}) - 10 \cdot n_2 \cdot \log\left(\frac{d}{d_{bp}}\right) + RSS_0 && \text{if } d > d_{bp}
 \end{aligned} \tag{3}$$

여기서, RSS 와 RSS_0 는 각각 산출된 신호 세기 및 1m 거리에서 측정되는 신호 세기 값을 의미한다. d 와 d_{bp} 를 각각 현재까지의 거리 및 영역 분리 거리를 나타낸다. n_1 과 n_2 는 d_{bp} 를 기준으로 나뉘어지는 신호 감쇄 상수이다.

2.2 측정치 활용 보정

실내 공간의 모든 장애물을 고려하여 RSS 분포를 모델링하는 것은 매우 어렵다. 따라서, 위의 모델링 결과를 fingerprinting database로 활용하기 위해서는 실제 측정치를 활용해야 한다. 하지만, 실내 모든 공간에 대한 측정치를 획득하는 것은 인력 및 비용 소모가 매우 크다. 이를 해결하기 위하여 제안 기술은 매우 일부 영역에서의 측정치를 활용하여 식 (4)와 같이 모델링 결과를 보정한다.

$$RSS_c = RSS_s + \sum_i \frac{1}{dist_i^2} \cdot (RSS_{m,i} - RSS_s)$$

여기서, RSS_c , RSS_s , RSS_m 은 각각 보정된 신호 세기, 모델링 신호 세기, 그리고 측정된 신호 세기를 의미한다. $dist_i$ 는 i -번째 신호 측정 위치와 보정하고자 하는 위치 사이의 거리를 의미한다.

3. 결과 분석

3.1 테스트 환경

제안 기술의 성능 확인을 위해 Fig. 2a에서와 같이 9개의 Bluetooth beacon을 설치 후 정해진 경로를 따라 움직이며 RSS 정보를 수집하였다. 이동 경로 내 위치 별 RSS를 정의하기 위해 pedestrian dead reckoning (PDR) 정보를 함께 수집하였다. 성능 분석을 위하여 테스트 수행 전, Fig. 2b와 같이 직접 데이터를 수집하여 실내 공간에 대한 radio map을 구축하였다.

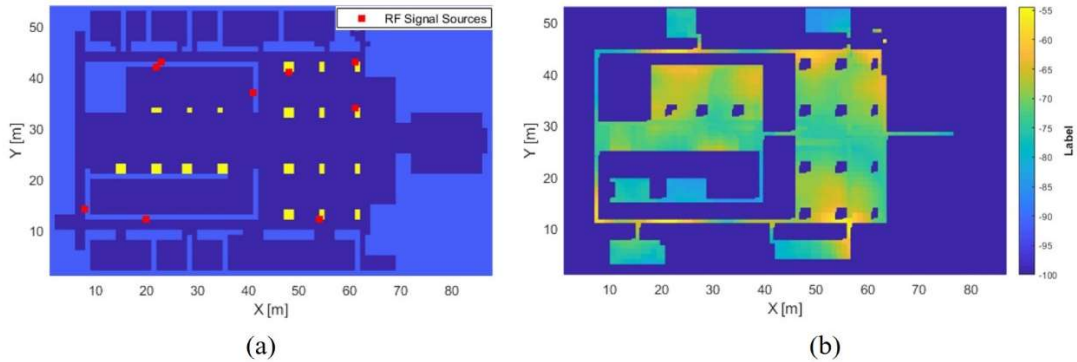


Fig. 2. Test environment, (a) RF signal sources, (b) radio map.

3.2 테스트 결과

제안 기술을 활용하여, Fig. 2a 환경에서 추정된 RSS 분포는 Fig. 3a와 같다. 직접 데이터를 수집하여 생성한 Fig. 2b와 유사한 분포를 보이지만, 신호가 미약한 구간에서 오차가 발생함을 확인할 수 있다. Fig. 3c는 모델링을 통한 RSS 분포 Fig. 3a를 Fig. 3b와 같이 매우 일부 구간에서 측정된 측정치를 활용하여 보정한 결과이다.

Fig. 3a의 모델링 결과와 실제 측정치 Fig. 2b를 비교 하였을 때, 평균 1.6 dBm 오차를 나타내었다. 최대 오차는 34.6 dBm이며, root mean square error (RMSE)는 8.1 dBm으로 나타났다. Fig. 3b의 일부 측정치로 모델링 결과를 보정함으로써 측정된 평균, 최대 및 RMSE는 각각 0.8, 34.5 그리고 4.9 dBm 이다. 실제 측정치를 모델링에 반영함으로써 오차를 크게 향상시켰지만, 매우 깊숙이 위치한 방안 영역에 대한 모델의 정확도가 낮아 최대 오차를 줄이지는 못하였다. 하지만, 모델링 오차가 크게 발생한 -100 ~ -80 dBm 구간에서 80% 이상의 오차가 5 dBm 미만으로 나타나 실제 측위에서도 정확한 위치를 산출할 수 있음을 확인하였다.

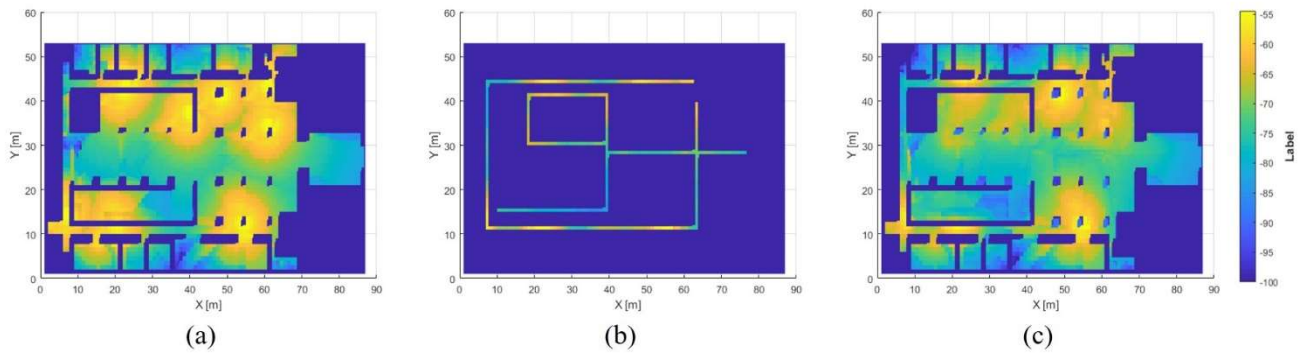


Fig. 3. Test results, (a) only modeling, (b) measurements, (c) measurement update.

4. 결론

RF 신호를 활용한 실내 측위 기술에서 fingerprinting 방식은 신호 잡음, 왜곡 및 multipath 등에 비교적 강인한 장점을 지니고 있다. 하지만, radio map 구축에 상당한 시간과 비용이 요구되는 문제가 있다. 이를 해결하고자 본 논문에서는 신속하고 정확하게 radio 맵을 구축하고자, 실내 RSS 분포 모델링 기술을 제안하였다. 제안 기법은 벽, 기둥, 그리고 출입구 등의 간단한 정보를 활용하여 heuristic 방식으로 RF 신호의 전파 경로를 추정한다. 이 경로 상의 RSS 변화를 추정함으로써 실내 전체 공간에 대한 RSS 분포를 산출한다. 마지막으로, 실내 공간 일부 구간에서의 측정치를 활용하여 추정된 RSS 분포를 보정함으로써 정확한 radio map을 구축할 수 있다. 제안 기술은 실내 공간에 가상의 RF 신호원 배치를 통하여 서비스 지역의 RF coverage를 radio map 구축 이전에 확인할 수 있다. 또한, 빠른 radio map 구축으로 fingerprinting 기반의 측위 기술 서비스에 매우 효과적으로 활용될 수 있다.

REFERENCES

- Huy, Q. T. & Cheolkeun, H. 2014, Fingerprinting-based indoor positioning system using visible light communication, *Electronics*, 8, 3306-3316. <https://doi.org/10.3390/electronics8010063>
- Lee, J. H., Shin, B., Shin, D., Kim, J., Park, J., et al. 2020, Precise indoor localization: rapidly-converging 2d surface correlation-based fingerprinting technology using LTE signal, *IEEE Access*, 8, 172829-172838. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3024933>
- Suroso, D. J., Adiyatma, F. Y. M., Cherntanomwong, P., & Sooraksa, P. 2022, Fingerprint database enhancement by applying interpolation and regression techniques for IoT-based indoor localization, *Emerging Science Journal*, 4, 167-189. <https://doi.org/10.28991/esj-2021-SP1-012>