JPNT 10(3), 207-214 (2021)
https://doi.org/10.11003/JPNT.2021.10.3.207

JPNT Journal of Positioning, Navigation, and Timing

Reference Particles-based LTE Base Station Positioning

Seong Yun Cho[1†], Jae Uk Kwon[2]

[1]Division of Robotics and Mobility, Kyungil University, Gyeongsan 38428, Korea
[2]Department of IT Engineering, Kyungil University, Gyeongsan 38428, Korea

ABSTRACT

A new positioning technique for positioning of LTE base stations is proposed. The positioning information of the base station is absolutely necessary for model-based wireless positioning, and is required in some of the various merhodologies for estimating signals in an uncorrected area when construnting a database for fingerprinting-based positioning. Using the acquired location-based Reference Signal Received Power (RSRP) information to estimate the location of the base station, it is impossible with the existing trilateration methods. Therefore, in this paper, a method using reference particles is proposed. Particles are randomly generated in the application area, and signal propagation modeling is performed assuming that a base station is located in each particle. Based on this, the errors of measurements are calculated. The particle group with the minimum measurement errors is selected, the position of the base station is estimated through weighted summation, and the signal propagation model of the corresponding base station is built at the same time. The performance of the proposed technology is verified using data acquired in Seocho-dong, Seoul.

Keywords: ITS, GPS, BDS, precise positioning, urban

1. INTRODUCTION

긴급구조 상황에서 요구조자의 위치정보는 성공적인 구조활동을 위해 매우 중요한 정보이므로 요구조자의 실내외 위치에 상관없이 위치정보를 획득하기 위해 GPS/GNSS, LTE, WiFi 등과 같은 무선신호기반 측위 기술이 활발하게 연구되고 있다 (Shin et al. 2020). 최근에는 과학기술정보통신부 긴급구조용 지능형 정밀측위 기술개발 사업으로 GPS 음영 지역에서 요구조자의 3차원 위치를 추정하는 연구가 진행중에 있다. 이 연구에서는 LTE 신호를 중심으로 획득 가능한 다중 무선신호의 패턴을 학습하여 요구조자의 위치를 추정하는 기술을 개발하는 것이다. 이를 위해 무선신호 획득 장치를 탑재한 차량을 통해 무선신호를 획득하고 이를 지능형 알고리즘 기반으로 DB화를 수행한다 (Cho 2020, Ji et al. 2020). 이 과정에서 LTE 신호의 전파모델을 사용하여 신호를 획득하지 못한 지역의 수신 가능한 신호를 생성하여 DB를 보강하는 것이 필요하다. 그러나 도심지역에서 LTE 신호의 전파모델은 기지국 인근에 위치한 건물들의 형상에 따라 다르며, 이를 고려한 전파모델링을 하기 위해서는 기지국의 위치정보가 필요하다. 그러나 기지국의 위치정보는 해당 이동통신사에서 관리되고 있으며 일반인에게는 공개되지 않는다 (Cho 2020). 이런 문제를 해결하기 위해 본 논문에서는 획득된 측정치를 사용하여 기지국의 위치를 추정하는 기술을 제안한다.

무선신호 획득 장치에는 LTE 신호를 이동통신사별로 수신하고, 또한 GPS 기반으로 측정치 획득 위치정보가 함께 저장된다. 이 정보를 사용하여 기지국의 위치정보를 추정한다. 이때 가장 쉬운 방법은 획득된 측정치 중에서 신호세기 (RSRP: Reference Signal Received Power)가 가장 큰 신호를 획득한 위치를 해당 기지국의 위치정보로 사용하는 것이다. 그러나 신호수집 차량이 기지국 인근을 지나지 않을 수 있으므로 이 경우에는 큰 오차가 발생할 수 있다. 이런 문제를 고려하여 본 논문에서는 기준 파티클 기반 최저 측정치 오차를 갖는 기지국 위치추정 기법을 제안한다. 먼저 기지국 별로 신호 획득 영역 안에서 기준 파티클들을 생성하고 각 파티클을 기지국의 위치로 가정한다. 각 파티클별로 측정치 오차를 계산한다. 그리고 계산된 오차 중 최소가 되는 파티클 군들의 가중합을 통해 해당 기지국의 위치로 추정한다. 제

Received Aug 10, 2021 **Revised** Aug 24, 2021 **Accepted** Aug 24, 2021
†**Corresponding Author**
E-mail: sycho@kiu.kr
Tel: +82-53-600-5584 Fax: +82-53-600-5599
Seong Yun Cho https://orcid.org/0000-0002-4284-2156
Jae Uk Kwon https://orcid.org/0000-0001-6222-5043

Copyright © The Institute of Positioning, Navigation, and Timing

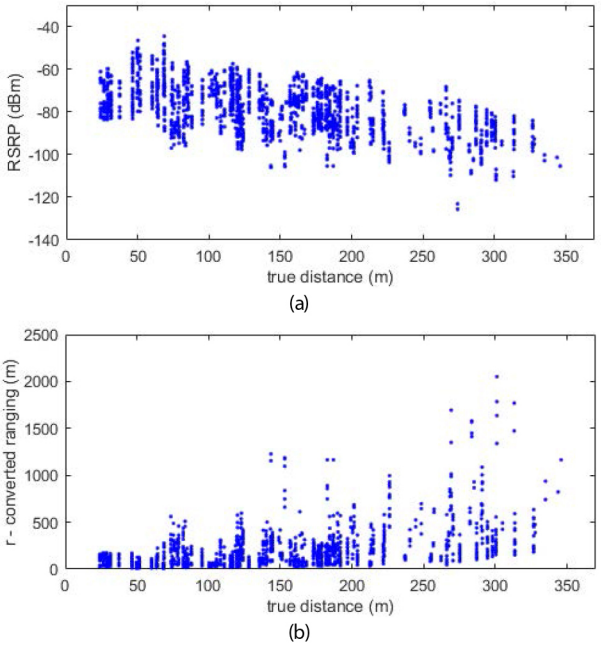


Fig. 1. Limitation of RSRP measurements-based ranging. (a) RSRP measurement, (b) converted ranging information.

안된 기법의 성능은 서울시 서초동에서 수행된 실험 데이터를 기반으로 검증한다. 실험 결과를 통해 검증된 본 논문의 기여도는 무선신호 전파 모델의 정확한 계수 정보를 모르는 상황에서 각 기지국별로 신호전파 모델링과 기지국의 위치추정이 동시에 이루어진다는 것이다.

2. REFERENCE PARTICLES-BASED BASE STATION POSITIONING

안테나에서 송출된 신호는 공간상을 전파(Propagation)하면서 그 세기가 점점 감쇄하게 되며 이 현상은 α-β-γ 모델, Close-in 모델 등으로 해석될 수 있다 (Diakhate 2019). 그러나 도심지역에서 신호의 전파감쇄는 건물들에 의한 투과 및 다중경로 등으로 인해 정확하게 모델링하기 어렵다. 또한 응용공간에 따라 다른 공간형상에 의해 각 기지국별로 다른 신호전파 모델링이 이루어져야 하며, 이때 건물들에 의한 추가 감쇄 현상은 모델링할 수 없다. 따라서 이 논문에서는 Eq. (1)과 같은 무선측위에서 일반적으로 사용되는 전파모델을 적용한다 (Han et al. 2016, Cho 2020).

$$P(r) = P(r_R) - 10\alpha \cdot \log_{10}(r / r_R) + w(\sigma) \tag{1}$$

여기서 P(r)은 기지국으로부터 거리 r에서 획득된 신호의 세기정보이며, r_R은 기준거리로 1 m로 설정할 수 있다. α는 신호감쇄 계수이며, $w(\sigma)$는 잡음으로 표준편차가 σ인 가우시안 분포로 정의한다.

Eq. (1)에서 $w(\sigma)$는 건물로 인한 추가감쇄 특성을 반영한다고 가정하고 전파모델을 해석한다. Eq. (1)을 거리정보로 환산하면 Eq. (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$r = r_R \cdot 10^{(P(r_R)-P(r)+w(\sigma))/10\alpha} = r_R \cdot 10^{\left(\hat{P}(r_R)-P(r)\right)/10\hat{\alpha}} \cdot w_r \tag{2}$$

여기서 $\hat{P}(r_R)$와 $\hat{\alpha}$는 측정치를 통해 추정된 파라미터이며, w_r는 잡음에 의한 거리오차로 Maclaurin 급수 전개를 통해 Eq. (3)과 같이 나타낼 수 있으며, 신호의 잡음은 환산계수 오차로 작용하는 것을 알 수 있다.

$$w_r = 10^{w(\sigma)/10\alpha} = 1 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(\ln 10)^n}{n!} \left(\frac{w(\sigma)}{10\alpha} \right)^n \tag{3}$$

Fig. 1은 도심지역에서 획득된 RSRP 측정치 및 이를 Eq. (2)를 통해 계산된 거리정보를 나타낸 것으로 거리별로 거의 비슷한 크기의 잡음을 갖는 예를 나타내고 있으며 Fig. 2a는 서초동 PCI-174번 RSRP 측정치이며 이 정보를 거리정보로 변환한 것이 Fig. 2b이다. 그러나 신호세기 잡음은 Eq. (3)에서 알 수 있듯이 거리로 환산되는 경우 환산계수 오차로 작용하게 되므로 거리에 따라 점점 더 커지는 거리환산 오차를 갖게 되는 것을 Fig. 1b를 통해 확인할 수 있다. 따라서 LTE 신호 기반으로 획득된 측정치를 거리정보로 환산한 다음 삼변측위를 통해 기지국의 위치를 추정하는 것은 불가능 하다는 것을 알 수 있다. 이런 문제점을 고려하여 본 논문에서는 기준 파티클들을 사용하여 기지국의 위치를 추정한다.

측정치들의 획득 위치정보는 GPS 기반으로 확보되며, 이 정보를 기반으로 응용공간($[Lon_{min}\ Lon_{max}\ Lat_{min}\ Lat_{min}]$)을 결정한다. 여기서 Lat와 Lon은 각각 위도와 경도를 의미하며, min과 max는 측정치 위치정보 중에서 최소값과 최대값을 의미한다. 이를 기반으로 응용공간 내에서 Eq. (4)와 같이 파티클을 생성한다.

$$Pos^{p(j)} \equiv \begin{bmatrix} Lat^{p(j)} \\ Lon^{p(j)} \end{bmatrix}_{j\in\{1,2,\cdots,N_p\}} = \begin{bmatrix} Lat_C + randn \cdot (Lat_{\max} - Lat_C)/2 \\ Lon_C + randn \cdot (Lon_{\max} - Lon_C)/2 \end{bmatrix} \tag{4}$$

여기서 Lat_C와 Lon_C는 응용공간 내의 위경도 좌표상의 중심이며, $randn$은 $N(0, 1)$의 표준분포를 갖는 난수이다. 그리고 N_p은 파티클의 수이다.

각 파티클을 기지국의 위치로 가정하고 전파모델링을 수행한다. 이를 위해 Eq. (1)을 Eq. (5)와 같이 변환한다 (Cho 2020).

$$\begin{bmatrix} 1 & -10\cdot\log_{10}(\hat{r}_1^{p(j)}/r_R) \\ \vdots & \vdots \\ 1 & -10\cdot\log_{10}(\hat{r}_{N_M}^{p(j)}/r_R) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P^{p(j)}(r_R) \\ \alpha^{p(j)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P(r_1) \\ \vdots \\ P(r_{N_M}) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} w_1(\sigma) \\ \vdots \\ w_{N_M}(\sigma) \end{bmatrix}$$
$$\Leftrightarrow \quad H^{p(j)} X^{p(j)} = Z - W \tag{5}$$

여기서 N_M은 측정치의 수이며, 상위첨자 $P(j)$는 j번 파티클을 의미한다. Z는 획득된 측정치 벡터이며, $\hat{r}_i^{p(j)}$은 Eq. (6)과 같이 계산된다.

$$\hat{r}_i^{p(j)} = \sqrt{\left((Lat^{p(j)} - Lat_i)R_m\right)^2 + \left((Lon^{p(j)} - Lon_i)R_t \cos Lat^{p(j)}\right)^2} \tag{6}$$

여기서 R_m과 R_t는 위도 $Lat^{p(j)}$상에서 위도방향과 경도방향으로 계산된 지구 반경이다 (Farrell & Barth 1999). $[Lat_i\ Lon_i]^T$는 i번 측정

치를 획득한 위치정보이며 측정치 획득 장비에 함께 탑재된 GPS 수신기 기반으로 주어진다. 이때 GPS 데이터는 Satellite-Based Augmentation System (SBAS) 기반의 Differential GPS (DGPS) 결과이다.

최소자승법으로 전파모델 계수를 추정하면 Eq. (7)과 같다.

$$\hat{X}^{p(j)} \equiv \begin{bmatrix} \hat{P}^{p(j)}(r_R) \\ \hat{\alpha}^{p(j)} \end{bmatrix} = \left((H^{p(j)})^T H^{p(j)}\right)^{-1} (H^{p(j)})^T Z \quad (7)$$

그 다음 각 파티클 별로 측정치 오차를 Eq. (8)과 같이 계산한다.

$$\delta^{p(j)} = \sum_{i=1}^{N_m} \left(\hat{r}_i^{p(j)} - \tilde{r}_i^{p(j)}\right)^2 \quad (8)$$

여기서 $\hat{r}_i^{p(j)}$은 Eq. (6)으로 계산되며, $\tilde{r}_i^{p(j)}$는 파티클과 측정치 획득 위치 사이의 거리를 추정된 전파모델 계수를 사용하여 Eq. (9)와 같이 계산한 것이다.

$$\tilde{r}_i^{p(j)} = r_R \cdot 10^{\left(\hat{P}^{p(j)}(r_R) - \tilde{P}(r_i^{p(j)})\right)/10\hat{\alpha}^{p(j)}} \quad (9)$$

여기서 ~는 측정치 오차를 포함하고 있음을 의미한다.

이 과정은 생성된 파티클의 수만큼 반복한다. 그 다음 k-Nearest Neighbor (k-NN) 기반으로 기지국의 위치를 추정하기 위해 최소 측정치 오차를 작는 k개의 파티클을 선정한다. 최소 오차를 갖는 하나의 파티클 보다 k-NN을 사용함으로써 측정치 오차를 저감하도록 한다. 그리고 Eq. (10)과 같이 기지국의 위치를 k개의 파티클의 위치 가중합 (Weighted Sum)을 통해 추정한다.

$$Pos_{BS} = \sum_{i=1}^{k} w^{sp(i)} Pos^{sp(i)} \quad (10)$$

여기서 $Pos^{sp(i)}$는 작은 크기 순으로 Sorting된 측정치 오차에 해당하는 파티클의 위치이며, 가중치는 Eq. (11)과 같이 계산된다.

$$w^{sp(i)} = (\delta^{sp(i)})^{-1} / \sum_{j=1}^{k} (\delta^{sp(j)})^{-1} \quad (11)$$

3. EXPERIMENTAL ANALYSIS

본 논문에서 제안된 기지국 위치추정 기법의 성능을 분석하기 위하여 실험을 수행하였다. 서울시 서초동에서 차량시험을 통해 획득된 데이터를 사용하였다. 이동통신사 KT의 USIM 칩을 장착한 Nemo Handy를 차량에 탑재하고 도로상에서 데이터를 획득하였다. 그리고 분석을 위해 사용된 기지국의 위치정보는 KT로부터 연구목적으로 제공받았다. 측정된 데이터 중에서 가장 많은 측정치를 획득한 기지국 5개를 선정하여 실험을 수행하였다.

Fig. 2는 PCI-174번 기지국 신호 측정치를 사용하여 기지국의 위치를 추정한 결과를 보여주고 있다. Fig. 2a에서 파란색 점들은 측정치를 획득한 위치를 보여주고 있다. 차량 시험을 통해 신호를 획득하므로 도로상에서만 측정치 위치가 나타나는 것을 알 수 있다. 물론 이 위치 정보에는 GPS 오차를 포함하고 있다. 그리고 초록색 점들은 측정치 획득 영역 내에서 파티클을 생성한 위치를

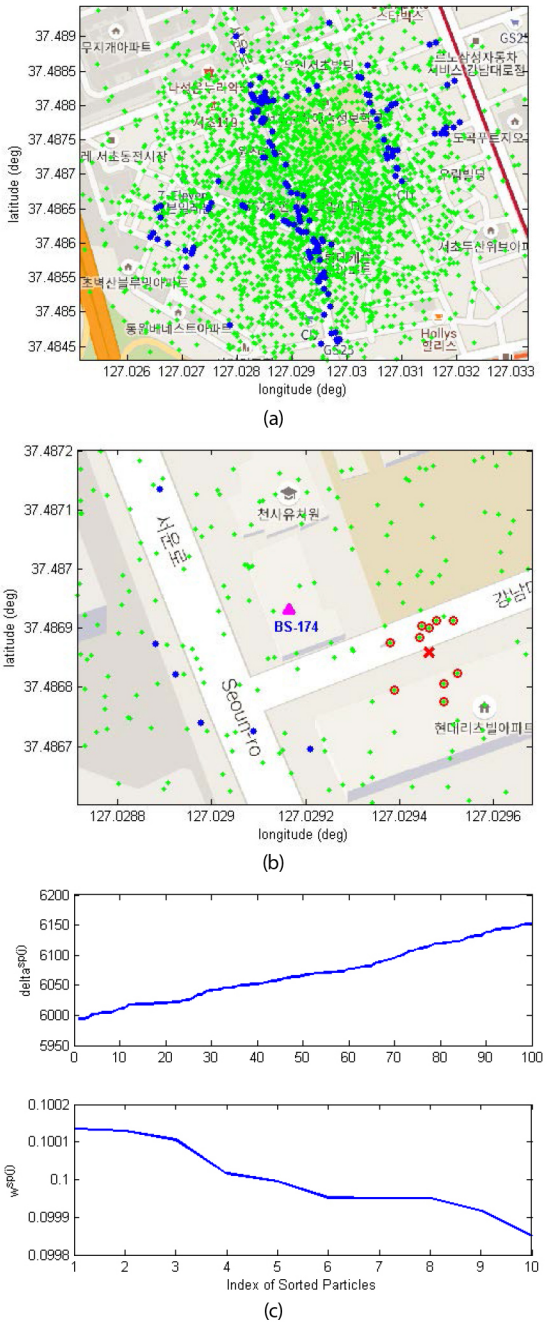


Fig. 2. Analysis of positioning results of base station PCI-174. (a) measurements and generated particles, (b) estimated and true positions of the base station, (c) $\delta^{sp(1)} \sim \delta^{sp(100)}$ and $w^{sp(1)} \sim w^{sp(10)}$

나타내고 있으며 이 실험에서 파티클의 수는 3000개로 설정하였다. 파티클의 수는 응용영역의 범위에 따라 가변적으로 생성할 수 있다.

Fig. 2b에서 삼각형은 174번 기지국의 참 위치를 나타낸 것이며, 10개의 빨간색 원은 3000개의 파티클 중에서 최소 측정치 오차를 갖는 10개를 나타낸 것이다. 즉 k-NN에서 k가 10인 경우에 선정된 10개의 후보 파티클이 되며, Eq. (10)을 통해 가중합을 한 것이 빨간색 x로 표시된 곳으로 해당 기지국의 위치로 추정된 것

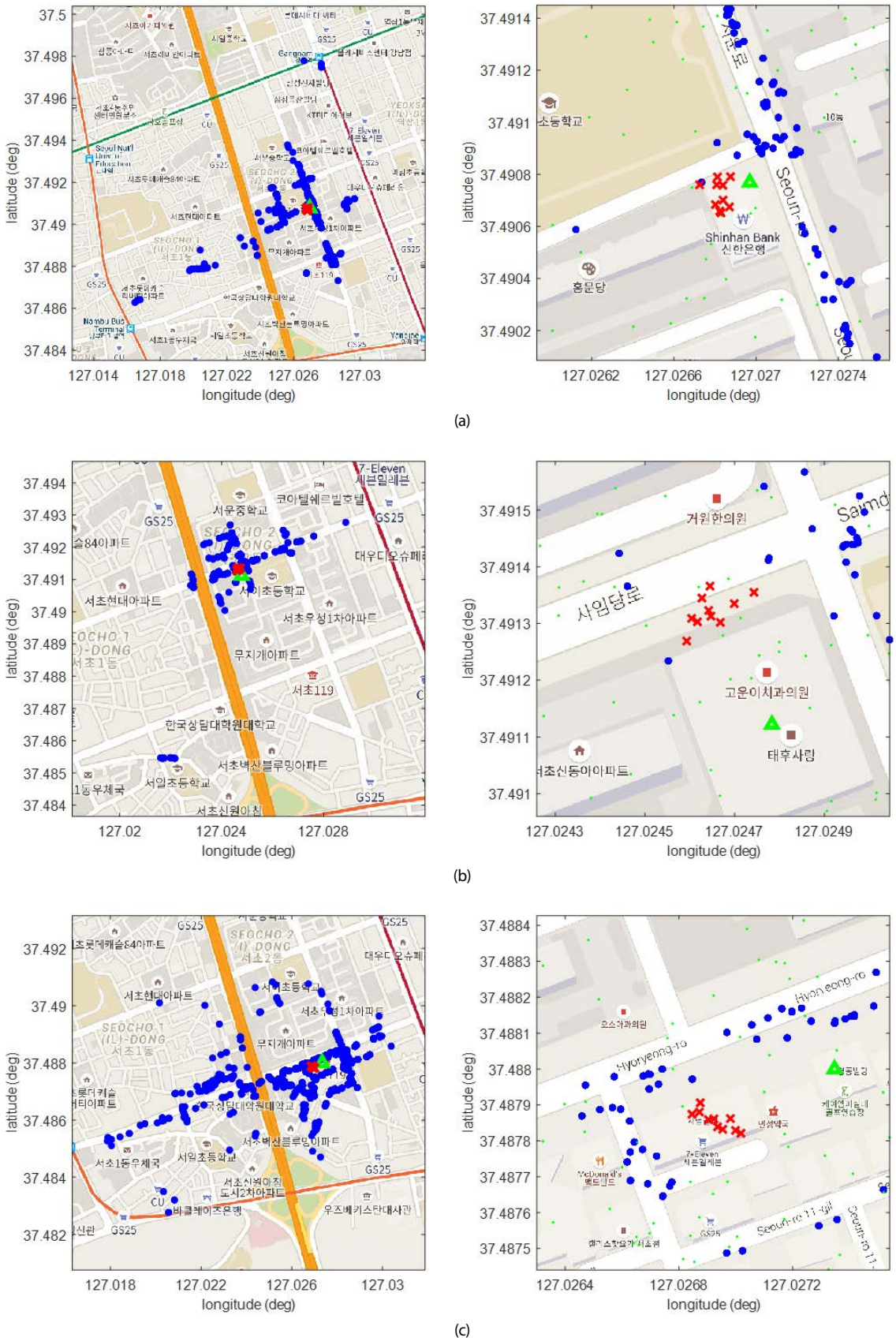
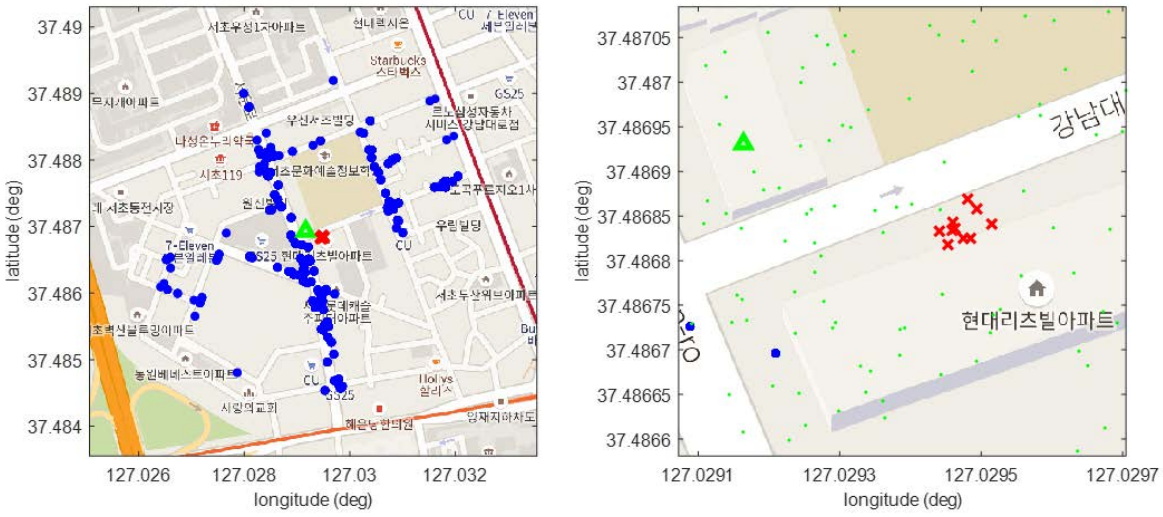
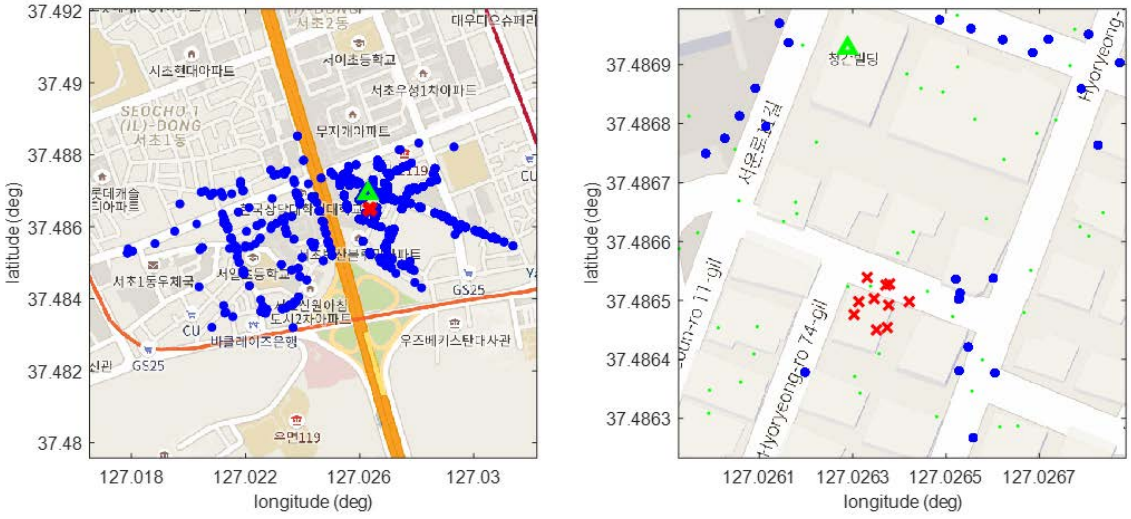


Fig. 3. Results of base station positioning. (a) PCI-58, (b) PCI-60, (c) PCI-144, (d) PCI-174, (e) PCI-176



(d)



(e)

Fig. 3. Continued

이다. Fig. 2를 통해 기지국은 건물 위에 설치되어 있는 것을 알 수 있고, 추정된 위치는 정확하지는 않지만 기지국 인근에 위치하는 것을 알 수 있다. 위치추정 오차는 파티클의 생성위치, 측정치 획득 위치오차, 기지국의 높이에 따른 2D 기반 위치추정 오차, 등에 영향을 받는다.

Fig. 2c는 Sorting된 파티클별 측정치 오차의 하위 100개와 이를 기반으로 계산된 10개의 파티클의 가중합을 위한 가중치를 보여주고 있다. 이를 통해 파티클 별 측정치 오차가 크지는 않지만 뚜렷한 차이를 가지며 그 현상은 파티클 별로 기지국과의 위치 차이가 나며, 또한 이를 기반으로 이루어진 신호전파 모델링의 정확도 차이에 의해 발생한다. 측정치 오차 기반으로 Sorting된 하위 10개의 파티클용 가중치는 서로간의 차이는 크지 않음을 알 수 있다. 그러나 이를 기반으로 추정된 기지국의 위치는 비교적 적합하게 추정되는 것을 Fig. 2b를 통해 확인할 수 있다.

Fig. 3은 실험에서 선정된 5개의 기지국별로 측정치와 기지국 추정 위치를 나타내고 있다. 각 그림에서 파란색 점들은 측정치가 획득된 위치를 나타내고 있으며, 초록색 삼각형은 기지국의 참 위치를 나타낸 것이다. 그리고, 10개의 빨간색 x는 각 기지국 별로 파티클 생성을 10번씩 랜덤으로 수행한 후 각각 추정된 기지국의 위치를 나타낸 것이다. 그리고 Table 1은 위치 추정치의 통계적 오차를 나타내고 있다. 각 그림의 오른쪽은 왼쪽 그림의 기지국 부분을 확대한 것이다. Fig. 3a는 PCI-58번 기지국의 경우

Table 1. Statistical error of positioning erroes.

PCI	Positioning errors	
	Mean (m)	Standard deviation (m)
58	17.78	4.34
60	27.04	2.19
144	48.19	5.13
174	35.16	2.14
176	48.42	3.32
Mean	35.32	3.42

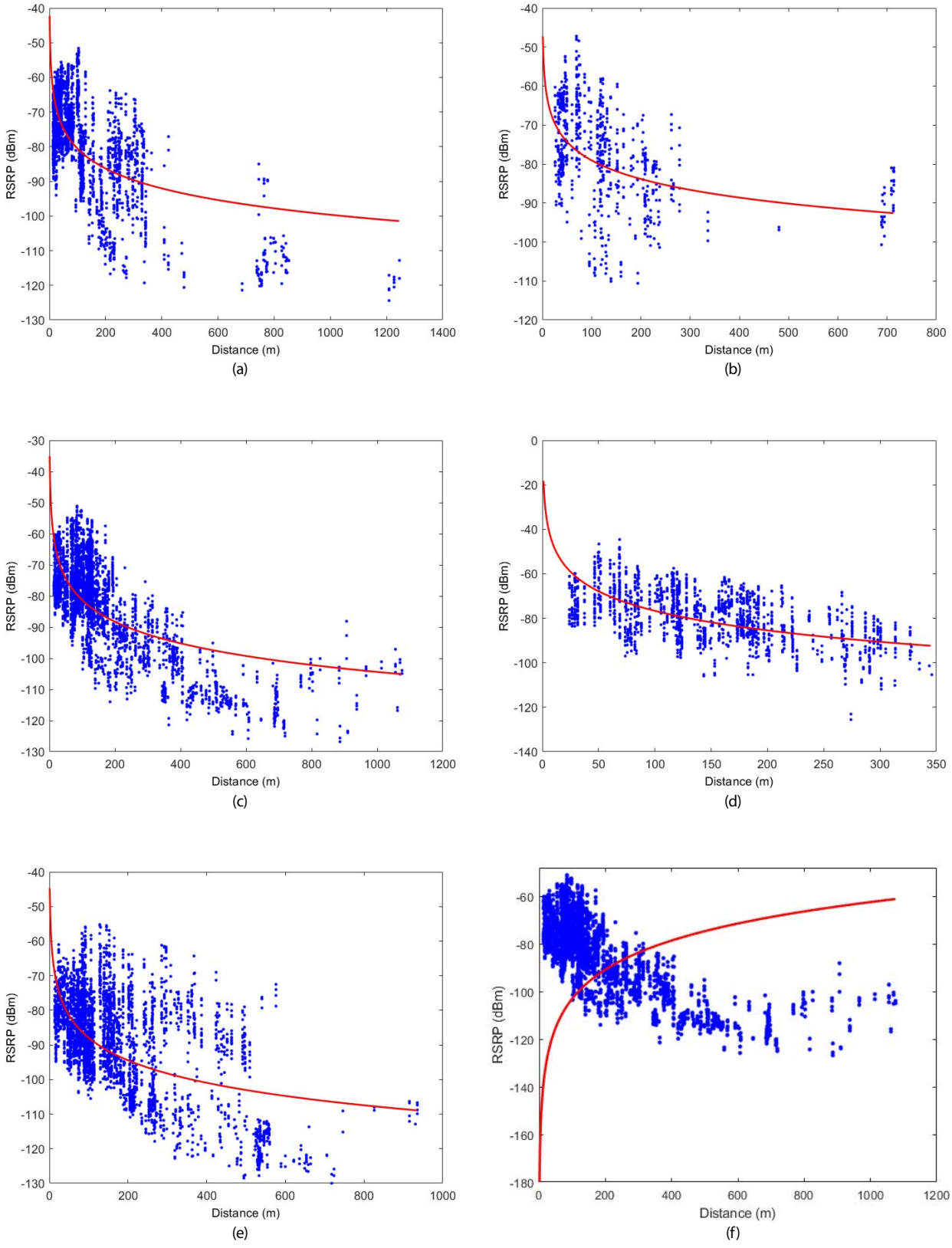


Fig. 4. Results of signal propagation modeling. (a) PCI-58, (b) PCI-60, (c) PCI-144, (d) PCI-174, (e) PCI-176, (f) example of incorrect signal propagation modeling due to base station positioning error in PCI-144

Table 2. Estimated parameters of the signal propagation model.

PCI	Positioning errors	
	$\hat{P}(r_R)$	$\hat{\alpha}$
58	-42.28	1.91
60	-47.31	1.59
144	-35.09	2.31
174	-21.97	2.75
176	-47.81	2.01

로, 10개의 추정치가 기지국이 설치된 건물 위에서 정확하게 추정되는 것을 알 수 있다. Fig. 3b는 PCI-60번 기지국의 경우이며, 기지국이 설치된 건물의 바로 옆에서 비교적 안정적으로 위치가 추정되고 있음을 알 수 있다. 그러나 Fig. 3c의 경우에서는 PCI-144번 기지국이 설치된 건물 부근에서 위치가 추정되지 못하고 다른 건물 위에서 추정되고 있다. 기 이유는 기지국 신호가 대로를 따라 먼 곳까지 전파되어 수신되는 경우로 신호가 대로 방향과 건물 방향으로 각각 다르게 잔파되며, 또한 방향별로 다른 전파 모델 특성이 나타나기 때문이다. Fig. 3d는 PCI-174번 기지국의 경우이며, PCI-144번과 유사한 지리적 특성과 기지국 위치추정 특성이 나타나는 것으로 확인된다. 그리고 Fig. 3e는 PCI-176번 기지국의 경우로, 5가지 경우 중에서 위치추정 오차가 가장 크게 나타나고 있다. 다른 경우보다 측정치의 수가 많으며 기지국으로부터 먼 곳까지 신호가 전파되는 경우이다. 도심지역에서는 수신되는 신호가 대부분 None-Line-of-Sight (NLoS) 신호이며, 다중경로로 인한 신호의 감쇄가 모델링 되지 못하는 것이 일반적이다. 따라서 기지국의 위치추정 정확도는 측정치의 수가 비교적 많아야 좋지만 항상 측정치의 수에 비례하지는 않으며 오히려 넓은 영역에서 획득된 측정치는 위치추정에 좋지 못한 영향을 미치게 된다는 것을 알 수 있다.

Fig. 4는 거리에 따른 RSRP와 신호전파 모델링의 결과를 보여주고 있다. 추정된 기지국의 위치정보를 기반으로 Eq. (7)을 통해 모델 파라미터를 추정한 다음 Eq. (1)을 사용하여 거리에 따른 RSRP 정보를 계산하여 출력한 것이 Fig. 4의 빨간색 선이다. 신호전파 모델은 정답이 없다. 기지국의 위치와 인근 건물들의 형상, 그리고 측정치의 획득 위치에 따라 통계적으로 결정되는 것으로 거리에 따른 측정치와 추정된 값 사이의 유사성으로 판단할 수 있다. 따라서 본 논문에서 추정된 기지국의 위치를 기반으로 모델링된 신호전파 특성은 거리에 따른 측정치를 잘 반영하고 있음을 Fig. 4를 통해 확인할 수 있다. 그러나 Fig. 4f는 PCI-144에서 파티클 1번을 기지국의 위치로 선정한 경우에 신호전파 모델링의 결과로 기지국의 위치추정 오차는 잘못된 신호전파 모델을 생성하게 된다는 것을 알 수 있다. 신호전파 모델은 응용 공간 내에서 발생하는 잡음을 포함한 모든 오차를 모델링할 수 없으며, 최소자승법 기반의 회귀모형 (Regression Model)으로 신호전파 특성을 모델링하는 것이다. Table 2에서 나타낸 모델의 각 파라미터 추정치를 통해 같은 파워로 송출된 신호는 기지국 인근 환경에 따라 다른 전파 특성을 갖게 된다는 것을 알 수 있다.

5개의 기지국 기반으로 실험을 한 결과 평균 35.52 m의 정확도로 기지국의 위치가 추정 가능함으로 확인되며, 이렇게 추정된 기지국의 위치정보와 신호전파 모델을 기반으로 LTE 기반으로 요구조자의 위치를 추정하기 위한 DB 구축에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 이 논문에서 다른 방법과의 비교분석이 빠진 이유는 두 가지가 있다. 첫 번째는 LTE 시스템에서 기지국의 위치추정에 관한 문헌이 없다. 두 번째는 RSRP 정보를 거리정보로 환산한 측정치를 사용한 삼변측위로는 이 논문과 비교할 만한 기지국의 위치정보를 추정할 수 없다. 따라서 이 논문은 비교분석이 없어도 LTE 시스템의 기지국 위치추정 기법으로 그 의미를 부여할 수 있다.

4. CONCLUSIONS

본 논문에서는 측정된 위치기반 LTE RSRP 정보를 사용하여 기지국의 위치를 추정하는 기법을 제안하였다. 안테나에서 송출된 신호의 파워는 공기중에 전파하면서 점점 감쇄되며 Log 함수로 모델링할 수 있다. 그러나 도심지역에서 건물에 의한 추가적인 감쇄는 정확하게 모델링할 수 없다. 이런 이유로 RSRP 측정치를 사용하여 삼변법 원리로는 기지국의 위치를 찾을 수 없다. 따라서 본 논문에서는 기준 파티클 기반으로 기지국의 위치를 추정하는 기법을 제안하였다. 먼저 응용공간 내에 파티클들을 생성하고, 각 파티클을 기지국의 가상 위치로 설정한 다음 전파 모델링과 측정치 오차를 계산한다. 그리고 측정치 오차들 중에서 최소가 되는 파티클군들의 가중합을 통해 기지국의 위치를 추정한다. 제안된 기술의 성능은 서울시 서초동에서 획득된 데이터를 사용하여 검증하였다. 5개의 선정된 기지국의 위치를 추정한 결과 평균 35.52 m의 정확도로 추정되는 것으로 확인되었다. 또한 각 기지국별로 인근 환경이 고려된 전파모델도 동시에 구축 가능함을 확인하였다. 이 연구의 결과는 LTE 기반 무선측위에 다양한 방법으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported by Institute of Information & Communications Technology Planning & Evaluation (IITP) grant funded by the Korea government (MSIT) (No. 2019-0-01401, Multi-source based 3D emergency LOCalization using machine learning techniques.)

AUTHOR CONTRIBUTIONS

S. Y. contributed to the design and implementation of the algorithm and to the writing of the manuscript. J. U. contributed to basic procrssing of raw data. S. Y. supervised the research as a project administrator. All authors discussed the proposed approach and results.

CONFLICTS OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

REFERENCES

Cho, S. Y. 2020, LTE signal propagation model-based fingerprint DB generation for positioning in emergency rescue situation, Journal of Positioning, Navigation, and Timing, 9, 157-167. https://doi.org/10.11003/JPNT.2020.9.3.157

Diakhate, C. A. L. 2019, Propagation channel modeling at centimeter-and-millimeter-wave frequencies in 5G urban micro-cell context, Ph.D. thesis, University Paris-Saclay.

Farrell, J. A. & Barth, M. 1999, The Global Positioning System & Inertial Navigation (NY: McGraw-Hill)

Han, S., Gong, Z., Meng, W., Li, C., Zhang, D., et al. 2016, Automatic precision control positioning for wireless sensor network, IEEE Sensors Journal, 16, 2140-2150. https://doi.org/10.1109/JSEN.2015.2506166

Ji, M., Jeon, J., & Cho, Y. 2020, A positioning DB generation algorithm applying generative adversarial learning method of wireless communication signals, Journal of Positioning, Navigation, and Timing, 9, 3, 151-156. https://doi.org/10.11003/JPNT.2020.9.3.151

Shin, B., Lee, J. H., Shin, D., Yu, C., Kyung, H., et al. 2020, Performance enhancement of emergency rescue system using surface correlation technology, Journal of Positioning, Navigation, and Timing, 9, 183-189. https://doi.org/10.11003/JPNT.2020.9.3.183

Seong Yun Cho received the B.S., M.S., and Ph.D. degrees in Control and Instrumentation Engineering from Kwangwoon University in 1998, 2000, and 2004, respectively. From 2003 to 2004, he was an Assistant Researcher with Automatin and System Research Institute, Seoul National University. He was a BK 21 Post-Doctoral Fellow with Seoul National University in 2004. From 2004 to 2013, he was with Electronics and Telecommunications Research Institute as a senior researcher. From 2008 to 2013, he was an Adjunct Professor with the University of Science and Technology. In 2013, he joined the faculty of the Department of Robotics Engineering at Kyungil University, where he is currently an associate professor. His current research topics include positioning and navigation systems, filtering theory for linear/nonlinear systems, sensors-based motion detection, autonomous driving system, and location-based services.

Jae Uk Kwon received the B.S. degrees in Mechanical and Automotive Engineering from Kyungil University in 2020. He is currently studying for a master's degree in IT Engineering at Kyungil University. His current research topics include LTE-based fingerprinting for positioning, UWB-based wireless positioning, and navigation for autonomous vehicle.