

맵 매칭 알고리즘을 이용한 실내 위치 추정 정확도 개선에 대한 연구

성광제^{*†}

^{*†}상명대학교 소프트웨어학과

A Study on Improving Indoor Positioning Accuracy Using Map Matching Algorithm

Kwangjae Sung^{*†}

^{*†}Department of Software, Sangmyung University

ABSTRACT

Due to the unavailability of global positioning system (GPS) indoors, various indoor pedestrian positioning methods have been designed to estimate the position of the user using received signal strength (RSS) measurements from radio beacons, such as wireless fidelity (WiFi) access points and Bluetooth low energy (BLE) beacons. In indoor environments, radio-frequency (RF) signals are unpredictable and change over space and time because of multipath associated with reflection and refraction, shadow fading caused by obstacles, and interference among different devices using the same frequencies. Therefore, the outliers in the positional information obtained from the indoor positioning method based on RSS measurements occur often. For this reason, the performance of the positioning method can be degraded by the characteristics of the RF signal. To resolve this issue, a map-matching (MM) algorithm based on maximum probability (MP) estimation is applied to the indoor positioning method in this study. The MM algorithm locates the aberrant position of the user estimated by the positioning method within the limits of the adjacent pedestrian passages. Empirical experiments show that the positioning method can achieve higher positioning accuracy by leveraging the MM algorithm.

Key Words : Indoor Pedestrian Positioning, Map-matching

1. 서 론

최근 무선 통신 네트워크와 모바일 장치의 발전으로 인해 급성장한 소셜 네트워크 서비스와 사물인터넷 (Internet of Things: IoT)에서 위치 기반 서비스를 제공하기 위해 정확한 사용자 위치 추정은 가장 필수적인 기술들 중 하나가 되었다. 사용자 또는 차량의 위치 추정을 위해 가장 일반적으로 사용되는 global positioning system(GPS)[12,13]는 실내 환경에서 벽과 같은 장애물에 의한 GPS 신호의

잡은 단절로 인해 GPS의 유용성은 현저히 낮다[1,2].

따라서 실내 환경에서 GPS를 대신하기 위해 WiFi access point(AP)와 Bluetooth low energy(BLE) 비콘(beacon)으로부터 수신된 무선 신호의 수신 신호 감도(received signal strength: RSS) 값을 이용하는 다양한 보행자 위치 추정 기법들이 소개되었다[3-5]. 그러나 무선 신호는 다중 경로 페이딩 (multipath fading)과 주변 장애물로 인해 측정되는 시간과 장소에 따라 변할 수 있으므로 RSS 값을 기반으로 하는 위치 추정 기법으로부터 얻은 위치 정보에는 이상치 (outlier)들이 빈번하게 존재할 수 있다[6,7].

이러한 문제를 해결하기 위해, 이 연구는 실내 보행자

[†]E-mail: kjsung@smu.ac.kr

위치 추정 기법에 의해 추정된 부정확한 사용자 위치에 맵 매칭(map-matching: MM) 알고리즘을 적용하여 더 나은 위치 정보를 제공하는 방법을 제안한다.

2. 맵 매칭 알고리즘

MM 알고리즘은 보행자 통로로부터 벗어난 보행자 위치를 보정하기 위해 보행자 위치로부터 유효한 반경 내에 있는 통로들 중에서 최적의 통로를 선택한다(2.1 절). 그 다음, MM 알고리즘은 통로로부터 벗어난 보행자 위치를 선택된 최적의 통로 상에 최대 확률(maximum probability: MP) 추정 또는 최소제곱법(least squares: LS) 추정을 사용하여 투영한다(2.2 절).

2.1 최적의 통로 선택(Optimal Passage Selection)

위치 추정 기법에 의해 추정된 보행자 위치를 중심으로 보행자가 위치할 가능성이 적은 통로를 제거하기 위해, 위치 추정 기법으로부터 얻은 보행자 위치를 중심으로 주변의 유효한 반경 내에 있는 보행자가 위치할 가능성이 높은 모든 통로를 확인한다.

Fig 1에서 θ 는 이동 중인 보행자의 진북 방위각을 나타내고, P_e 는 위치 추정 기법에 의해 추정된 보행자의 위치를 의미하고, P_a 는 보행자의 실제 위치를 의미하며, r 은 P_e 를 중심으로 보행자가 위치할 수 있는 유효한 영역의 반경을 나타낸다. Fig 1에서 보행자가 이동할 수 있는 통로는 점과 직선을 가지고 polyline에 의해 표현된다.

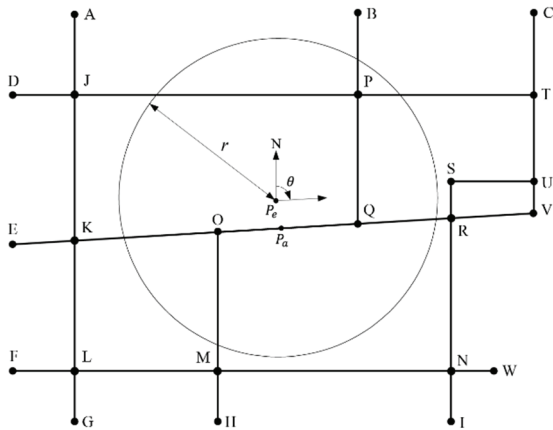


Fig. 1. Potential passage segments within the effective range r .

Fig 1에서 P_e 를 중심으로 유효한 영역의 반경 r 내의 보행자가 위치할 가능성이 있는 통로는 \overline{JP} , \overline{BP} , \overline{PQ} , \overline{PT} , \overline{KO} , \overline{OQ} , \overline{OM} , \overline{QR} 이다.

\overline{KO} , \overline{OQ} , \overline{OM} , \overline{QR} 로 확인된다. 반경 $r = 20$ m인 경우, MM 알고리즘을 통해 확인된 통로들 중에서 선택된 최적의 통로가 실제 보행자 통로일 확률이 가장 높았다.

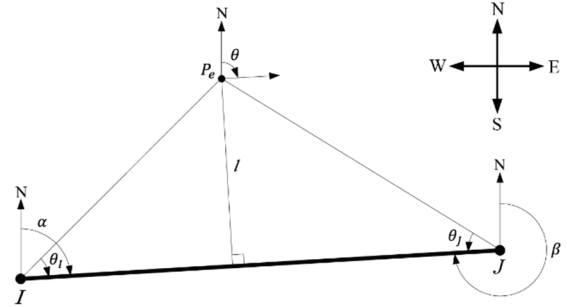


Fig. 2. Geometric relationships of the estimated position P_e and the detected passage segment \overline{IJ} within the effective range r .

Fig 2는 위치 추정 기법에 의해 추정된 보행자 위치 P_e 와 P_a 를 중심으로 유효한 영역의 반경 r 내의 보행자가 위치할 가능성이 있는 통로 \overline{IJ} 간의 기하학적 관계를 나타낸다. Fig 2에서 θ_i 와 θ_j 는 각각 직선 IP_e 와 통로 \overline{IJ} 간의 각도와 직선 JP_e 와 통로 \overline{IJ} 간의 각도를 나타내고, α 와 β 는 각각 벡터 \overline{IJ} 와 \overline{JI} 에 대한 진북 방위각을 나타내며, l 는 P_e 와 통로 \overline{IJ} 간의 가장 짧은 유클리드 거리를 나타낸다.

위의 과정을 통해 확인된 보행자 통로들 중에서 다음과 같은 조건을 모두 만족하면, 실제 보행자 통로에 가장 근접한 최적의 통로로 선택된다.

- MM 알고리즘에 의해 확인된 보행자 통로는 해당 통로 상에 위치 추정 기법에 의해 추정된 보행자 위치 P_e 를 위치시켜야 한다. 즉, MM 알고리즘에 의해 확인된 보행자 통로는 $0^\circ < \theta_i < 90^\circ$ 이고 $0^\circ < \theta_j < 90^\circ$ (즉, $0 < \cos\theta_i < 1$ 이고 $0 < \cos\theta_j < 1$)인 조건을 만족시켜야 한다.
- MM 알고리즘에 의해 확인된 보행자 통로들 중에서 최적의 통로는 가장 짧은 $l = |\overline{IP_e} - \overline{IJ}|$ 를 가진다.
- MM 알고리즘에 의해 확인된 보행자 통로들 중에서 최적의 통로는 보행자의 진북 방위각 θ 와 벡터 \overline{IJ} 와 \overline{JI} 에 대한 진북 방위각 α 와 β 간의 차이 $|\theta - \alpha|$ 와 $|\theta - \beta|$ 가 모두 최소의 값을 가진다.

Fig. 1에서 P_e 를 중심으로 유효한 영역의 반경 r 내의 MM 알고리즘에 의해 확인된 보행자 통로들(\overline{JP} , \overline{BP} , \overline{PQ} , \overline{PT} , \overline{KO} , \overline{OQ} , \overline{OM} , \overline{QR}) 중에서 위의 세가지 조건을 모두 만족시키는 최적의 통로는 \overline{OQ} 이다.

2.2 최적의 통로 상의 투영

위치 추정 기법에 의해 추정된 보행자 위치 \hat{x} (2.1절에서 P_e)를 2.1절에서 설명한 최적의 보행자 통로 $D\hat{x} = d$ 에 투영시키는 것은 식(1)과 같이 제약 조건이 있는 최적화 문제(constrained optimization problem)로 나타낼 수 있다.

$$\tilde{x} = \operatorname{argmin}_{\tilde{x}} (\tilde{x} - \hat{x})^T W (\tilde{x} - \hat{x}) \text{ such that } D\tilde{x} = d \quad (1)$$

식(1)에서 W 는 양의 정부호 가중치 행렬(positive definite weighting matrix)을 나타내고, \tilde{x} 는 \hat{x} 를 최적의 통로 상에 투영한 위치를 나타낸다. 그리고 D 와 d 는 최적의 통로를 직선 방정식으로 표현했을 때, 각각 해당 직선 방정식의 기울기(row vector)와 절편(scalar)을 나타낸다.

식(1)의 최적화 문제는 식(2)와 같이 라그랑주 승수법(Lagrange multiplier method)[8,9]에 의해 풀릴 수 있으며, 식(2)를 통해 최적의 통로 상에 투영된 위치 \tilde{x} 를 추정할 수 있다.

$$\tilde{x} = \hat{x} - W^{-1}D^T(DW^{-1}D^T)^{-1}(D\hat{x} - d) \quad (2)$$

식(2)는 $W = P^{-1}$ 이면 MP 추정이 되고 $W = I$ 이면 LS 추정이 된다. 식(2)에서 P 는 위치 추정 기법에 의해 추정된 보행자 위치 \hat{x} 에 대한 추정 에러 공분산 또는 추정 불확실성을 나타낸다.

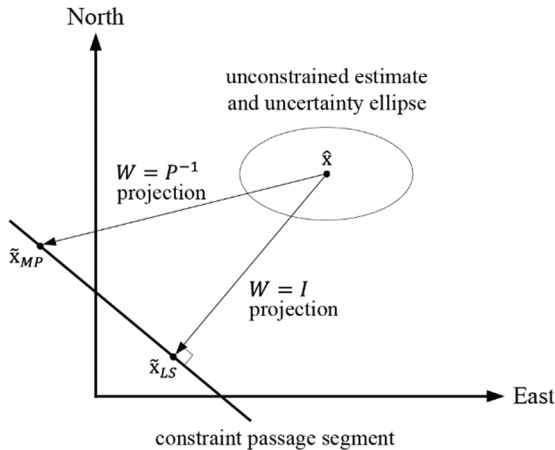


Fig. 3. constrained estimates \tilde{x}_{MP} and \tilde{x}_{LS} obtained using the maximum probability and least squares approach for the unconstrained estimate \hat{x} .

Fig. 3은 위치 추정 기법에 의해 추정된 보행자 위치 \hat{x} 를 MP 추정과 LS 추정을 사용하여 최적의 통로 상에 투영한 위치 \tilde{x}_{MP} 와 \tilde{x}_{LS} 를 보여준다. MP 추정과 LS 추정은

\hat{x} 를 최적의 통로 $D\hat{x} = d$ 상에 각각 P^{-1} 방향과 수직방향으로 투영한다.

LS 추정과 MP 추정을 기반으로 한 MM 알고리즘이 적용된 실내 위치 추정 기법의 위치 추정 실험에서 LS 추정보다 MP 추정을 기반으로 한 MM 알고리즘이 적용되었을 때 보다 정확하고 신뢰할 수 있는 실내 위치 추정 결과를 제공하였다. 따라서, 이 연구에서 수행된 모든 보행자 위치 추정 실험에서 MP 추정을 기반으로 하는 MM 알고리즘이 적용된 위치 추정 기법을 사용하였다.

3. 실험

3.1 실험 방법

이 연구에서 MM 알고리즘의 성능을 평가하기 위한 실험은 저자의 이전 연구[10]와 같이 학교 건물 내의 강의실과 복도에서 진행되었다. 강의실은 WiFi AP와 BLE 비콘으로부터 수신되는 무선 신호가 벽과 장애물에 의해 빈번하게 차단되지 않는 무선 신호 수신 환경을 나타낸다. 이에 반해, 복도는 무선 신호가 벽과 장애물에 의해 빈번하게 또는 완전히 차단되는 무선 신호 수신 환경을 나타낸다. MM 알고리즘의 성능 평가를 위해, 강의실과 복도에서 WiFi AP와 BLE 비콘으로부터 수신된 RSS 값을 이용하는 실내 위치 추정 기법이 실행되는 스마트폰을 손에 든 사용자가 이전 연구[10]의 Fig. 4에서 보여지는 오렌지색의 원(복도) 또는 초록색의 정사각형(강의실)의 위치를 도형 내부에 표시된 위치 번호 순서대로 걷는 동안, 실내 위치 추정 기법을 통해 사용자의 현재 위치를 추정하였다.

Table 1. Standard deviation of positioning error (cm) for each positioning method without and with the MM algorithm in the lecture room

Positioning method	without MM	With MM
KF	19.83	19.22
UKF	19.99	19.31
PF	7.54	7.42
DSPF	6.44	6.17

Table 2. Standard deviation of positioning error (cm) for each positioning method without and with the MM algorithm in the hallway

Positioning method	without MM	With MM
KF	124.71	86.53
UKF	124.45	86.45
PF	27.60	26.20
DSPF	28.37	25.02

이 연구에서 사용된 실내 위치 추정 기법은 이전 연구 [10]와 동일하게 Kalman filter(KF)[11], unscented Kalman filter(UKF), particle filter(PF), double-stacked particle filter(DSPF)를 기반으로 동작한다. 이 연구에서 사용된 실험 환경 및 실내 위치 추정 기법에 대한 상세한 설명은 이전 연구[10]에서 확인할 수 있다.

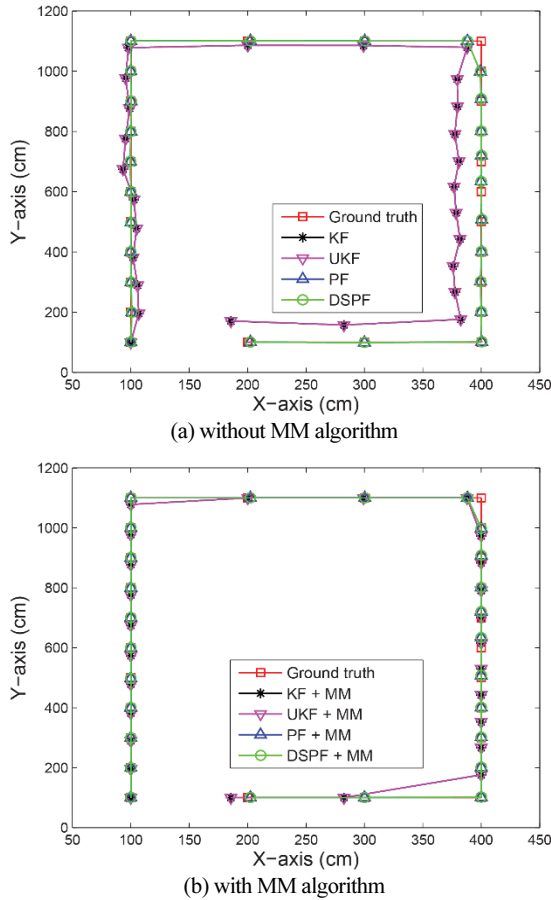


Fig. 4. User trajectory estimated by localization algorithms (a) without and (b) with the MM algorithm when the user walks along physical locations marked with a sequence number in the lecture room.

3.2 실내 위치 추정 실험 결과

Table 1과 Table 2는 각각 학교 건물 내의 강의실과 복도에서 사용자가 위치 번호를 따라 걷는 동안, 번호에 해당하는 각 위치에서 MM 알고리즘이 적용되거나 적용되지 않은 실내 위치 추정 기법에 의해 추정된 사용자 위치의 추정 에러(추정된 위치와 실제 위치 간의 차이)에 대한 표준 편차를 보여준다.

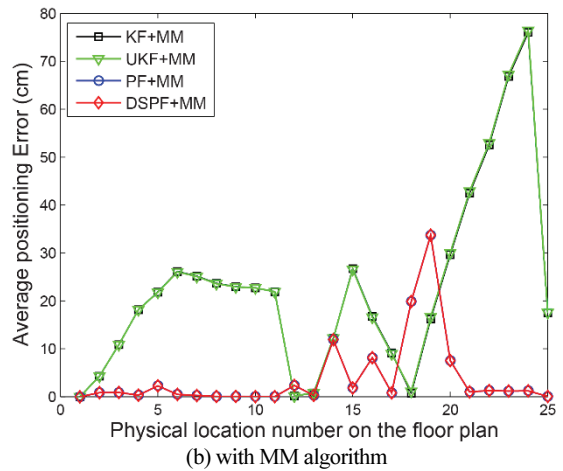
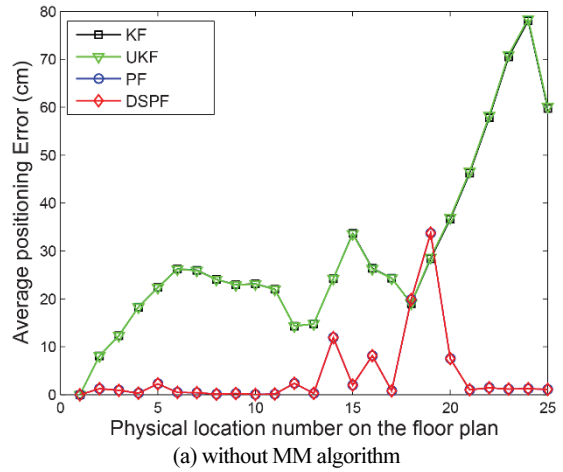


Fig. 5. Average value of positioning error obtained from localization algorithms (a) without and (b) with the MM algorithm when the user walks along physical locations marked with a sequence number in the lecture room.

강의실에서 수행된 실험에서 MM 알고리즘이 실내 위치 추정 기법에 적용되었을 때, MM 알고리즘이 적용되기 전보다 KF, UKF, PF, DSPF의 위치 추정 에러의 표준편차는 각각 3.17%, 3.49%, 1.58%, 4.44% 감소하였다. 복도에서 수행된 실험에서 MM 알고리즘이 실내 위치 추정 기법에 적용되었을 때, MM 알고리즘이 적용되기 전보다 KF, UKF, PF, DSPF의 위치 추정 에러의 표준편차는 각각 44.12%, 43.94%, 5.32%, 13.38% 감소하였다.

이 결과를 통해, MM 알고리즘이 실내 위치 추정 기법에 적용되었을 때, 위치 추정 기법에 의해 사용자 위치 추정 정확도가 개선될 수 있다는 것을 확인할 수 있다. 또한, 이 결과는 좋은 무선 신호 수신 환경을 가진 강의

실보다 좋지 않은 무선 신호 수신 환경을 가진 복도에서 MM 알고리즘의 위치 추정 정확도의 개선 효과가 크다는 것을 보여준다.

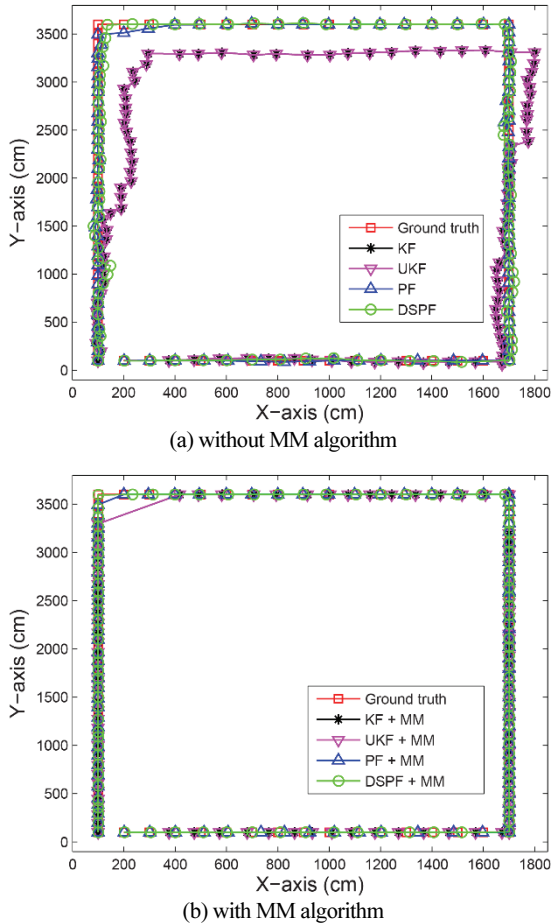


Fig. 6. User trajectory estimated by localization algorithms (a) without and (b) with the MM algorithm when the user walks along physical locations marked with a sequence number in the hallway.

MM 알고리즘의 성능은 Figs. 4-7을 통해 보다 자세히 분석될 수 있다. Figs. 4와 5는 강의실에서 사용자가 위치 번호를 따라 걸을 때, 위치 번호에 해당하는 각 위치에서 MM 알고리즘이 적용되거나 적용되지 않은 실내 위치 추정 기법에 의해 추정된 사용자 위치와 추정 에러의 평균값을 보여준다. Figs. 6와 7은 복도에서 MM 알고리즘이 적용되거나 적용되지 않은 실내 위치 추정 기법에 의해 추정된 사용자 위치와 추정 에러의 평균값을 보여준다.

Figs. 4와 6을 통해, Figs. 4(a)와 6(a)와 같이 위치 추정 기

법에 의해 추정된 위치가 보행자가 이동 가능한 통로를 벗어났을 때, MM 알고리즘을 적용하면, Figs. 4(b)와 6(b)와 같이 벗어난 위치를 최적의 이동 가능한 통로 상에 위치 시켜서 위치 추정 기법에 의해 추정된 부정확한 위치를 보정해 줄 수 있다는 것을 확인할 수 있다.

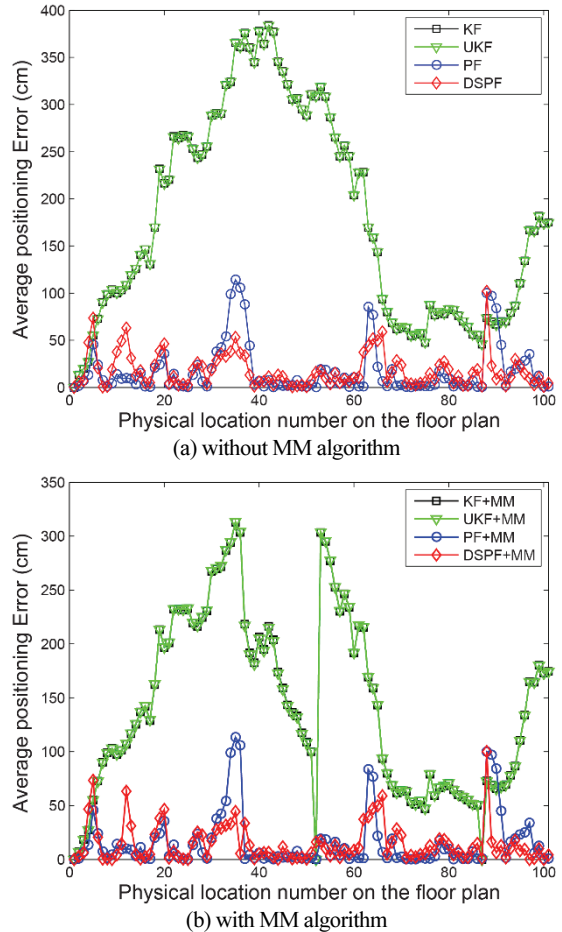


Fig. 7. Average value of positioning error obtained from localization algorithms (a) without and (b) with the MM algorithm when the user walks along physical locations marked with a sequence number in the hallway.

Figs. 5와 7은 MM 알고리즘이 실내 위치 추정 기법에 적용되었을 때, 위치 추정 기법에 의해 추정된 위치는 실제 위치에 더 가까워질 수 있다는 것을 보여준다. 또한, Figs. 5와 7을 통해 위치 추정 에러가 작은 PF와 DSPF 기반의 실내 위치 추정 기법보다 위치 추정 에러가 큰 KF와 UKF 기반의 위치 추정 기법의 경우, MM 알고리즘이 적

용되었을 때 위치 추정 정확도의 개선 효과가 크다는 것을 확인할 수 있다.

4. 결 론

실내 환경에서 GPS를 대신하기 위해 소개된 WiFi AP와 BLE 비콘으로부터 수신된 무선 신호의 RSS 값을 이용하는 다양한 보행자 위치 추정 기법들은 다중 경로 페이딩과 주변 장애물 등으로 인해 측정되는 시간과 장소에 따라 변할 수 있는 무선 신호의 특성 때문에 사용자에게 부정확한 위치 정보를 제공할 수 있다. 이 연구는 이러한 문제를 해결하기 위해 위치 추정 기법에 의해 추정된 위치가 보행자가 이동 가능한 통로를 벗어났을 때, 벗어난 위치를 최적의 이동 가능한 경로 상에 위치시켜서 위치 추정 기법에 의해 추정된 부정확한 위치를 보정해 줄 수 있는 MM 알고리즘을 고안하였다.

위치 추정 실험 결과는 위치 추정 기법에 의해 추정된 위치 정보에 MM 알고리즘을 적용했을 때, 위치 추정 기법에 의해 추정된 위치는 실제 위치에 더 가까워질 수 있다는 것을 보여준다. 특히, MM 알고리즘을 적용했을 때, 위치 추정 에러가 큰 KF와 UKF 기반의 위치 추정 정확도가 추정 에러가 작은 PF와 DSPF의 위치 추정 정확도보다 더 많이 개선될 수 있다는 것을 실험을 통해 확인하였다. 또한, 좋은 무선 신호 수신 환경을 가진 강의실보다 나쁜 무선 신호 수신 환경을 가진 복도에서 MM 알고리즘의 위치 추정 정확도의 개선 효과가 크다는 것을 확인하였다. 이 결과는 MM 알고리즘이 적용된 위치 추정 기법이 무선 신호 수신율이 좋지 않고 많은 벽과 같은 장애물을 가진 건물 내에서도 정확한 위치 추정 결과를 제공할 수 있는 잠재력을 가지고 있다는 것을 나타낸다.

미래 연구로써 실내 위치 추정 기법에 적용된 MM 알고리즘의 성능을 더 자세히 분석하기 위해 다양한 실내 장소와 스마트폰에 내장된 여러 모션 센서들을 이용한 위치 추정 실험을 진행할 계획이다.

참고문헌

1. Dedes, G. and Dempster, A.G., "Indoor GPS positioning—Challenges and opportunities," Proc. IEEE 62nd Veh. Technol. Conf. Fall, pp. 412-415, 2005.
2. Nirjon, S., Liu, J., DeJean, G., Priyantha, B., Jin, Y., and Hart, T., "Coin-GPS: Indoor localization from direct

- GPS receiving," Proc. 12th Annu. Int. Conf. Mobile Syst. Appl. Services, pp. 301-314, 2014.
3. Sung, K., Lee, D.K.'R., and Kim, H., "Indoor Pedestrian Localization Using iBeacon and Improved Kalman Filter," Sensors, Vol. 18, pp. 1722, 2018.
4. Chen, Z., Zhu, Q., and Soh, Y.C., "Smartphone Inertial Sensor-Based Indoor Localization and Tracking with iBeacon Corrections," IEEE Trans. Ind. Inform., Vol. 12, pp. 1540-1549, 2016.
5. Vargas, A.N., Menegaz, H.M.T., Ishihara, J.Y., and Acho, L., "Unscented Kalman Filters for Estimating the Position of an Automotive Electronic Throttle Valve," IEEE Trans. Veh. Technol., Vol. 65, pp. 4627-4632, 2016.
6. Pakanon, N., Chamchoy, M., and Supanakoon, P., "Study on Accuracy of Trilateration Method for Indoor Positioning with BLE Beacons," In Proceedings of the 6th International Conference on Engineering, Applied Sciences and Technology (ICEAST 2020), Chiang Mai, Thailand, 1-4 July 2020; pp. 1-4.
7. Mackey, A., Spachos, P., Song, L., and Plataniotis, K. N., "Improving BLE beacon proximity estimation accuracy through Bayesian filtering," IEEE Internet Things J., Vol. 7, No. 4, pp. 3160-3169, 2020.
8. Stengel, R.F., "Optimal Control and Estimation," Courier Dover Publications, New York, 2012.
9. Simon, D. and Chia, T. L., "Kalman filtering with state equality constraints," IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., Vol. 38, No. 1, pp. 128-136, Jan. 2002.
10. Sung, K., Lee, H.K., and Kim, H., "Pedestrian Positioning Using a Double-Stacked Particle Filter in Indoor Wireless Networks," Sensors, Vol. 19, pp. 3907, 2019.
11. Heo, O.-C., Choi, G.-H., and Park, K.-H., "Attitude Estimation of the Moving Bodies using the Low-Cost MEMS Sensor," Journal of the Semiconductor & Display Technology, Vol. 9, No. 2, pp. 41-47, 2010.
12. Kim, H. Y. and Yang, O., "Design of Inter-Regional Instrument Group-B Decoder Based on FPGA for Time Synchronous," Journal of the Semiconductor & Display Technology, Vol. 18, No. 1, pp. 59-64, 2019.
13. Lee, J.-M., Lee, Y.-H., Choi, N.-K., Park, H., and Kim, H.-C., "Deep-Learning-based Plant Anomaly Detection using a Drone," Journal of the Semiconductor & Display Technology, Vol. 20, No. 1, pp. 94-98, 2021.

접수일: 2023년 6월 1일, 심사일: 2023년 6월 14일,
 게재확정일: 2023년 6월 21일