

도심지 GNSS 다중경로 오차 지도 적용을 위한 다중경로 보정정보 위치 영역 투영 기법

Application of GNSS Multipath Map by Correction Projection to Position Domain in Urban Canyon

Yongjun Lee¹ · Heonho Choi² · Byungwoon Park¹ *

¹Department of Aerospace Engineering and Convergence Engineering for Intelligent Drone, Sejong University, Seoul, 05006, Korea

²Korea Aerospace Research Institute, Daejeon, 34133, Korea

[Abstract]

Multipath, a major error source in urban GNSS positioning (global navigation satellite system), pose a challenge due to its site-dependent nature, varying with the user's signal reception environment. In our previous study, we introduced a technique generating GNSS multipath map in urban canyon. However, due to uncertainty in initial GNSS positions, applying multipath maps required generating multiple candidate positions. In this study, we present an efficient method for applying multipath maps by projecting the multipath correction in position domain. This approach effectively applies multipath maps, addressing the challenges posed by urban user position uncertainties.

Key word : Correction Projection, GNSS, Multipath, Multipath Map, Urban Positioning.

1. 서론

GNSS는 4개 이상의 가시 위성만 확보되면 사용자에게 절대 위치 정보와 시각 정보를 제공할 수 있는 시스템으로, 무인지상 차량과 드론, 도심항공모빌리티 등 다양한 자율이동체의 핵심 항법 장치로 활용되어 왔다[1],[2]. 사람들이 밀집한 도심지에서 자율이동체가 점차 운용됨에 따라 도심지에서 GNSS의 신뢰성과 정확성 향상 요구가 증대되어 왔다. 하지만 밀집한 수요와는 반대로, 도심지 환경은 GNSS 신호 수신에 적합하지 않아 도심지에서 GNSS의 성능을 보장하는 것은 매우 어렵다. 도심지 환경에서 GNSS 신호는 밀집한 고층 건물들과 같은 신호 수신을 방해하는 장애물들로 인해 차폐되거나 반사되기 쉬우며, 반사된 신호의 수신은 다중경로오차라는 거리 오차를 유발하게 된다.

최근 도심지 GNSS 다중경로오차를 모델링하기 위하여 GNSS와 3D 건물 모델을 결합한 shadow matching과 ray tracing 과 같은 다양한 기법들이 연구되어 왔다. 이러한 3D 건물 모델과 GNSS를 결합하는 기법들은 정확한 사용자의 위치를 알고 있는 경우 사용자 주위의 3D 건물 모델을 이용하여 위성의 가시성을 판별하고 다중경로오차의 영향을 감쇄시키는 것이 가능하지만, 도심지에서 사용자는 GNSS를 이용하여 자신의 정확한 위치를 계산할 수 없으므로 많은 3D 건물 모델과 GNSS를 결합한 연구들에서는 계산된 초기 사용자 위치 주위에 다수의 가상 후보 위치를 생성하고, 각 후보 위치마다 반복적으로 3D 건물 모델과 GNSS 결합 기법들을 적용하는 방법들이 활용되어 왔다[3]. 게다가, 깊은 도심지 환경에서는 GNSS로 계산한 초기 사용자 위치 오차가 초기 사용자 위치 주위로 설정한 가상 사용자 위치 생성 범위를 초과하는 경우가 빈번히 발생하며, 이러한 경우 사용자는 실제 사용자의 위치와 전혀 다른 위치들에서 위성 가시성에 대한 시뮬레이션을 진행하게 될 수 있다.

최근 기계학습 기법을 이용하여 도심지 다중경로오차를 모델링하고, 학습한 모델로 도심지에 다중경로 지도를 생성하는 기법이 연구되었다[4],[5]. 해당 연구에서 제안한 다중경로오차 예측 모델은 위성의 양각과 방위각만을 이용하여 학습되며 사용자는 다중경로 지도를 이용하여 수신한 위성 측정치에 포함된 다중경로오차를 직접적으로 예측하고 제거할 수 있다. 하지만 선행 연구에서 다중경로 지도를 생성한 도심지에서는 다중경로 지도 사용자 초기 위치 불확실성으로 인하여, 다중경로 지도 적용 시 사용자 위치는 전혀 모르는 것으로 가정하고 다수의 다중경로 지도를 적용하여 다중경로 적용 위치가 유효 범위 내

<https://doi.org/10.12673/jant.2024.28.1.155>



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Received 20 December 2023; Revised 26 February 2024
Accepted (Publication) 28 February 2024 (29 February 2024)

*Corresponding Author; Byungwoon Park

Tel: +82-2-3408-4385

E-mail: byungwoon@sejong.ac.kr

에 존재하는 지 확인하는 과정을 거쳐야 한다[5].

본 논문에서는 선행 연구의 다중경로오차 지도를 효율적으로 적용하기 위하여 수신한 위성 별 측정치 보정정보 형태로 제공되는 다중경로 예측치를 초기 사용자 위치를 기준으로 위치 영역으로 투영하고, 다수의 다중경로 지도를 위치 영역에서 일괄적으로 적용하여 유효 범위 검사를 수행하는 기법을 제안하였다.

II. 도심지 GNSS 다중경로 지도 및 다중경로 지도 기반 보정정보 위치 영역 투영 기법

2-1 도심지 GNSS 다중경로 지도

선행 연구에서는 같은 방향에서 송신된 위성 신호는 같은 경로를 통하여 수신된다고 가정하고, 위성의 양각과 방위각만을 이용하여 다중경로 오차를 모델링하였다. i 번째 위성의 의사거리 측정치에 포함된 다중경로오차는(M_{Map}^i) 식 (1)과 같이 위성의 양각(EL^i)과 방위각(Azi^i)에 대한 함수로 나타낼 수 있으며, 다중경로 추정 모델은 SVM (support vector machine)을 기반 회귀 모델인 SVR을 이용하여 학습되어 보정정보 형태의 다중경로오차 예측값을 사용자에게 제공한다[4],[5].

$$M_{Map}^i = f(EL^i, Azi^i) \tag{1}$$

선행 연구에서 제안한 다중경로 지도는 도로의 폭과 같은 간격을 갖도록 도심지의 도로 위에 생성되었으며, 사용자는 자신의 위치 인근에 위치한 다중경로 지도로부터 다중경로오차 보정정보를 제공받는다. 하지만 선행 연구에서 다중경로 지도를 생성한 도심지 환경에서는 다중경로 지도의 유효 범위를 넘어서는 사용자 위치 불확실성이 빈번히 발생한다. 그림 1은 다중경로 지도가 생성된 도심지에서 약 1시간동안 주행한 차량의 DGNSS 측위 위치로부터 최단거리에 위치한 다중경로 지도 생성 위치까지의 거리 통계치를 나타낸 것이다. 50% 이상의 구간에서 초기 DGNSS 적용 위치로부터 가장 가까운 다중경로 지도까지의 거리가 도로의 폭과 같은 다중경로 지도 생성 간격 25 m를 초과하였으며, 도심지 내의 사용자는 이러한 초기 DGNSS 위치의 불확실성으로 인하여 인근 다중경로 지도를 선택하는 것이 불가능한 것을 보여준다.

따라서 도심지 환경에서 사용자는 초기 위치 불확실성으로 인하여 다수의 다중경로 지도를 하나씩 적용하고 각 다중경로 지도를 적용한 위치가 다중경로 지도의 유효 범위내에 존재하는지에 대한 유효성 검사를 수행되어야 한다. 그림 2에 도심지 내의 사용자에게 다중경로 지도를 적용하는 알고리즘 블록 선도를 도시하였다.

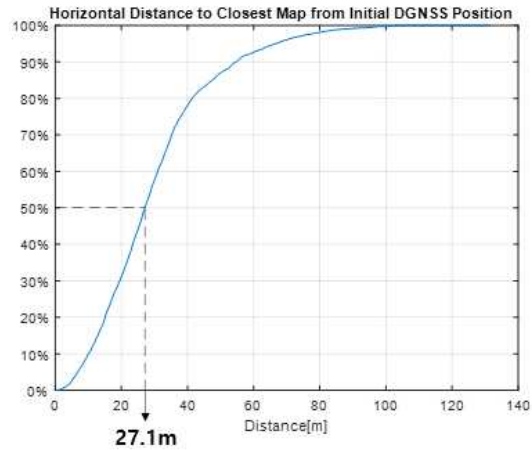


그림 1. 동적 실험 초기 DGNSS 적용 위치 오차 통계치
Fig. 1. Statistics of DGNSS position error in dynamic field test

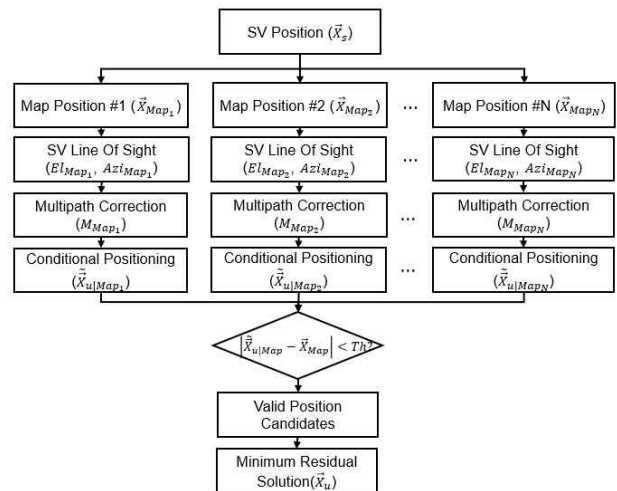


그림 2. 도심지 GNSS 다중경로 지도 사용자 적용 알고리즘 블록 선도
Fig. 2. Block diagram of GNSS multipath map user applied algorithm.

먼저 도심지에서 사용자는 자신의 위치에 대한 정보가 전혀 없는 것으로 가정하고, 각 다중경로 생성 지도가 생성된 위치(\vec{X}_{Map})와 위성의 위치(\vec{X}_s)를 이용하여 각 다중경로 지도 생성 지점마다 위성의 양각(EL_{Map})과 방위각(Azi_{Map})을 계산한다. 각 다중경로 지도 생성 위치에서 계산한 위성의 양각과 방위각은 해당 위치에 생성된 다중경로 지도를 사용하여 다중경로 오차(M_{Map})를 계산하는데 사용된다. 계산한 다중경로 오차는 DGNSS 보정정보가 적용된 측정치(ρ_{DGNSS})에서 제거하고, 다중경로 오차가 제거된 측정치는 아래 식 (2)와 같이 항법방정식을 구성하는데 사용된다.

$$\begin{bmatrix} \vec{X}_{u|Map} \\ B \end{bmatrix} = (H^T H) H^T \begin{bmatrix} \vdots \\ e^i \cdot \vec{R}^i - (\rho_{DG\text{NSS}}^i - M_{Map}^i) \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서 B 는 수신기 시계 오차, e^i 는 i 번째 위성의 가시벡터이며, R^i 는 사용자에서 i 번째 위성까지의 벡터, H 는 관측행렬을 의미한다. 식 (2)에서 구성한 항법방정식은 최소자승법 기반 반복 측위를 통하여 각 위치 후보($\vec{X}_{u|Map}$)를 계산하는 데 사용된다. 각 다중경로 지도를 사용하여 계산한 위치 후보들은 식 (3)과 같이 계산된 위치가 다중경로 지도의 유효 범위 (Th) 내에 포함되는지에 대한 유효성 검사를 수행한다 [7].

$$|\vec{X}_{u|Map} - \vec{X}_{Map}| < Th \quad (3)$$

최종적으로 유효성 검사를 통과한 유효 위치 후보들 중 최소 잔차 합을 갖는 후보가 최종 위치(\vec{X}_u)로 선정된다.

2-2 도심지 GNSS 다중경로 지도 기반 보정정보 위치영역 투영 기법

2-2에서 서술한 것과 같이 도심지 내의 사용자가 다중경로 지도를 적용하기 위해서는 생성된 N 개의 다중경로 지도를 각각 적용하여 N 개의 후보 위치를 생성한 후 유효성 검사를 통하여 유효한 다중경로 지도를 선별하는 과정을 거쳐야 한다. 식 (5)을 DG\text{NSS} 관련 항과 다중경로 보정정보 관련 항으로 나누고, 다중경로 보정정보 관련 항을 위치 영역으로 투영하면 아래 식 (4)로 나타낼 수 있다.

$$\delta \vec{X}_{u|Map} = (H^T H)^{-1} H^T \begin{bmatrix} \vdots \\ M_{Map}^i \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (4)$$

여기서 관측행렬 H 는 위성의 가시벡터로 구성된 행렬이므로, 각 다중경로 지도를 적용하여 최소자승법 기반 반복 측위마다 수행할 때마다 갱신되어야 하는 행렬이다. 하지만 관측행렬에 포함된 위성 가시벡터의 최소자승법 기반 반복 측위 과정 중 변화량은 매우 작은 값을 가지므로 초기 DG\text{NSS} 위치 기반으로 계산한 관측행렬을 이용하여 아래 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다[6],[7].

$$\delta \vec{X}_{u|Map} \approx (H_{DG\text{NSS}}^T H_{DG\text{NSS}})^{-1} H_{DG\text{NSS}}^T \begin{bmatrix} \vdots \\ M_{Map}^i \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (5)$$

식 (5)에서 위치 영역으로 투영한 다중경로 오차 값은 초기 DG\text{NSS} 기법 적용 위치에 기반하여 다중경로 지도로 계산한

오차를 위치 영역으로 투영시키므로, N 개의 다중경로 지도를 적용하더라도 한번의 DG\text{NSS} 측위만 수행하여 위치 영역으로 투영하는 것이 가능하다. 그림 3에 다중경로 지도로 계산한 다중경로 오차 위치 영역 투영 기법의 알고리즘 블록 선도를 도시하였다. 사용자는 초기 DG\text{NSS} 기법 적용 위치와 위성 위치를 이용하여 DG\text{NSS} 위치 기준의 위성의 양각과 방위각을 계산한다. 계산한 DG\text{NSS} 위치 기준 위성 양각($Ei_{DG\text{NSS}}$)과 방위각($Azi_{DG\text{NSS}}$)은 각 다중경로 지도를 이용하여 다중경로 오차를 계산하는 데 사용되며, 계산된 다중경로 오차들은 식 (5)을 이용하여 위치 영역으로 투영된다. 위치 영역으로 투영된 다중경로 오차 값은 위치 후보를 계산하는데 사용되며, 계산된 위치 후보들은 식 (3)을 사용하여 유효성 검사를 거친다. 최종적으로 유효성 검사를 통과한 유효 위치 후보들 중 최소 잔차를 갖는 위치 후보가 최종 위치로 결정된다.

III. 도심지 측위 실험 및 실험 결과

본 논문에서 제안한 기법의 적용성을 확인하기 위하여 서울특별시 강남구 테헤란로 인근에서 움직이는 차량을 이용하여 2021년 7월 1일 6:40부터 7:00까지 약 40분동안 GNSS 측정치를 수집하였다. 실험에는 5개 GNSS 지원 수신기인 Ublox Zed F9P 수신기를 이용하여 GNSS 측정치를 수집하였으며, 비교 좌표는 Novatel SPAN 장비를 이용하여 취득하였다.

그림 4는 두 기법으로 계산한 최종 위치의 3차원 차이 높 값을 도시한 것이다. 전체 동적 실험 구간에서도 마찬가지로 두 기법으로 계산한 최종 사용자 위치의 3차원 차이 높 값 평균치는 0.3 mm로 두 기법으로 계산한 위치는 거의 동일한 위치로 계산된 것을 확인할 수 있었다.

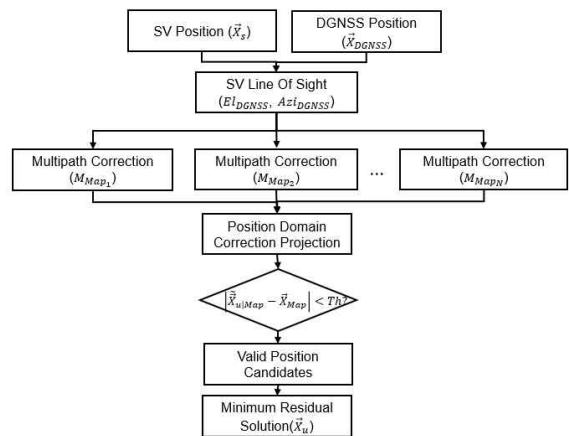


그림 3. 도심지 GNSS 다중경로 지도 위치 영역 투영 사용자 적용 알고리즘 블록 선도

Fig. 3. Block diagram of GNSS multipath map correction projection user applied algorithm.

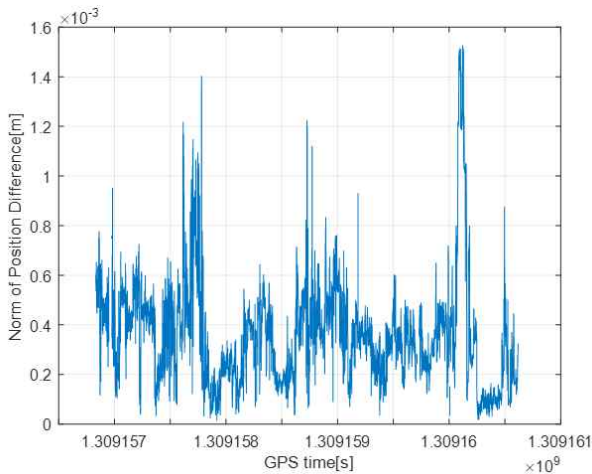


그림 4. 동적 실험 기존 다중경로 적용 기법 및 위치 영역 투영 기법 적용 위치결과 차이

Fig. 4. Position difference between original multipath map user applied algorithm and correction projection algorithm during dynamic field test.

그림 5는 전체 동적 실험 구간 기존 다중경로 지도 적용 기법 및 위치 영역 투영 기법을 적용하였을 때 계산된 최소자승법 기반 반복 측위 횟수를 도시한 것이다. 기존 다중경로 지도 적용 기법의 경우 실험 구간에 생성된 70개의 다중경로 지도를 각각 적용 시마다 반복 최소자승법 기반 측위 적용하여야 하지만, 제안한 기법은 초기 DGNSS 적용 위치 계산 시에만 최소자승법 기반 반복 측위를 수행한 후, 초기 DGNSS 사용자 위치를 기반으로 다중경로 지도로 계산한 다중경로 보정정보를 위치 영역으로 투영하여 수행하여야 하는 측위 횟수가 기존 다중경로 지도 적용 기법 대비 약 98.5% 감소한 것을 확인할 수 있었다.

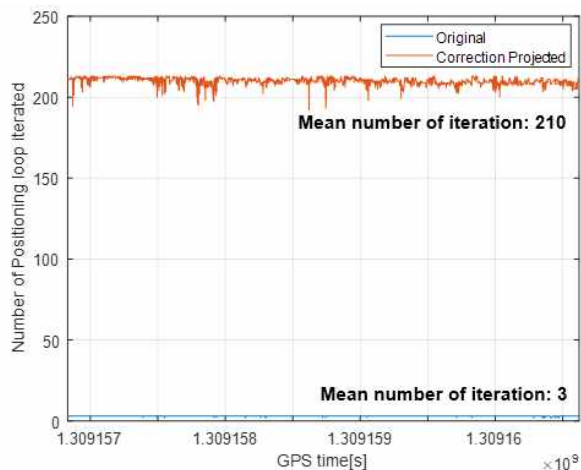


그림 5. 동적 실험 구간 기존 다중경로 지도 적용 기법 및 위치 영역 투영 기법 적용 최소자승법 기반 측위 횟수 차이

Fig. 5. Number of iteration of original multipath map user applied algorithm and correction projection algorithm during dynamic field test.

IV. 결 론

본 연구에서는 선행 연구에서 제안한 GNSS 다중경로 지도를 도심지 사용자에게 효과적으로 적용하기 위하여 다중경로 지도로 계산한 다중경로 보정정보를 초기 사용자 위치를 기반으로 위치 영역으로 투영하여 효과적으로 다중경로 지도를 사용자에게 적용하는 기법을 제안하였다. 제안한 기법은 강남구 테헤란로 인근의 도로에서 움직이는 차량으로 수집한 데이터에 적용되었으며, 적용 결과 제안한 기법은 기존 다중경로 지도 적용 기법 대비 약 98.5%의 측위 횟수를 감소시켰으며, 두 기법을 적용한 최종 위치의 차이는 약 0.1mm 수준인 것이 확인되었다.

Acknowledgments

본 연구는 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단, 무인인동체원천기술개발사업단의 지원을 받아 무인인동체원천기술개발사업을 통해 수행되었음.(No. 2020M3C1C1A01086407)

References

- [1] D.-K. Lee, Y. Lee, and B. Park, "Carrier phase residual modeling and fault monitoring using short-baseline double difference and machine learning," *Mathematics*, Vol. 11, No. 12, p. 2696, 2023.
- [2] H. Lee, J. Seo, and Z. Z. M. Kassas, "Urban road safety prediction: A satellite navigation perspective," *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, Vol. 14, No. 6, pp. 94-106, 2022.
- [3] P. D. Groves, "It's time for 3D mapping-aided GNSS," *Inside GNSS*, Vol. 5, pp. 50-56, 2016.
- [4] Y. Lee and B. Park, "Nonlinear regression-based GNSS multipath modelling in deep urban area," *Mathematics*, Vol. 10, No. 3, pp. 412, 2022.
- [5] Y. Lee, P. Wang and B. Park, "Nonlinear regression-based GNSS multipath dynamic map construction and its application in deep urban areas," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 24, No. 5, pp. 5082-5093, May 2023.
- [6] B. Park et al. "DGPS enhancement to GPS NMEA output data: DGPS by correction projection to position-domain," *The Journal of Navigation*, Vol. 66, No. 2, pp. 249-264, 2013.
- [7] D. Yoon et al. "Position accuracy improvement by implementing the DGNSS-CP algorithm in smartphones," *Sensors*, Vol. 16, No. 6, pp. 910-925, June 2016.