

실측 채널 기반 물성 정보 보정을 통한 고현실성 6G 디지털 트윈 제작 연구

박호연, 고민재, 민석기, 채찬병*
연세대학교

phoyeon@yonsei.ac.kr, *cbchae@yonsei.ac.kr

RF Channel Measurement based Hyper-Realistic Digital Twin Implementation

Hoyeon Park, Minjae Ko, Seokki Min, Chan-Byoung Chae*
Yonsei Univ.

요약

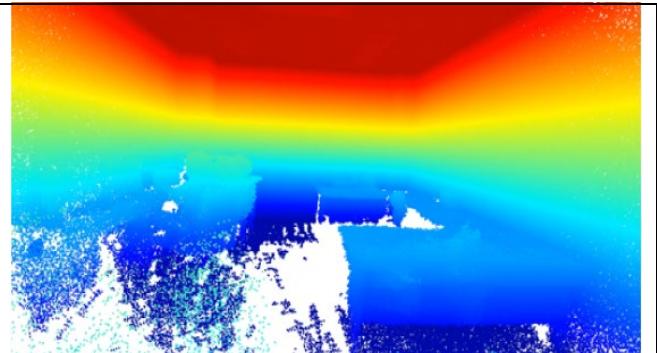
본 논문은 6G 무선 통신 시뮬레이션의 정확도를 향상시키기 위해 LiDAR 데이터와 실측 채널 데이터를 융합하여 고현실성 디지털 트윈 제작 프레임워크 기법을 제안한다. 기존 Sionna 및 Wireless Insite 등 레이트레이싱 툴에서 제공하는 3D 맵 모델의 낮은 정밀도 문제를 해결하기 위해, LiDAR SLAM을 활용하여 실제 환경을 정밀하게 모사한 포인트 클라우드를 획득하고 Gaussian Splatting 기법을 응용하여 3D Mesh 모델을 생성한다. 이후 USRP를 통해 획득한 실측 채널 임펄스 응답(CIR) 데이터를 기반으로 맵의 재질 파라미터(Material Parameter)를 최적화함으로써, 실제 환경의 전파 특성을 정확히 재현할 수 있는 고현실성 디지털 트윈을 구현하였다.

I. 서 론

6G 통신 환경은 초고주파 대역을 사용함에 따라 주변 지형지물에 의한 회절, 반사 등 전파 특성이 통신 성능에 결정적인 영향을 미친다. 그러나 현재 상용화된 레이트레이싱 시뮬레이션 도구들은 건물을 단순한 박스 형태로 묘사하거나 식생(나무 등)의 세부적인 구조를 반영하지 못해 실제 환경과의 위치 불일치 및 오차가 발생한다.

본 연구에서는 이러한 한계를 극복하기 위해 라이다(LiDAR) 센서를 이용한 자동적인 환경 스캔과 실측 기반 물성 보정 알고리즘을 결합한 디지털 트윈 구축 방안을 제시한다.

구조물이나 식생의 세부 형상을 자동화된 방식으로 정밀하게 획득한다. 또한 환경에 변화가 있을 때마다 재구축 가능하다.



[Figure 1.] LiDAR로 측정한 고정밀 포인트 클라우드. 좌표 정합과 outlier 제거를 통해 레이트레이싱 툴에서 위치 설정을 용이하게 한다.

II. 본론

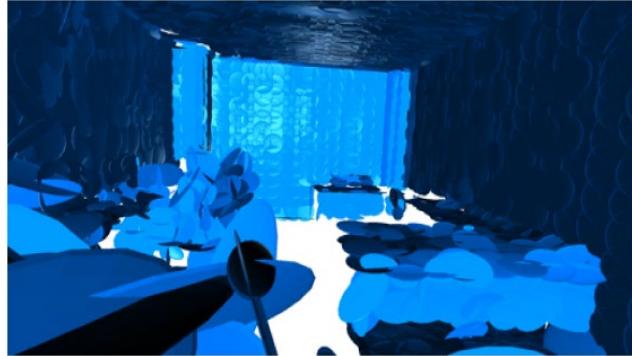
2.1 LiDAR SLAM 기반 고정밀 포인트 클라우드 생성

정확한 디지털 트윈의 기반이 되는 지형 정보를 얻기 위해 Livox Avia LiDAR 센서와 SLAM(Simultaneous Localization and Mapping) 알고리즘을 활용한다. 이를 통해 수동으로 모델링하기 어려운 복잡한 도심

2.2 Gaussian Fitting 응용 3D 모델링

획득된 포인트 클라우드 데이터에 Gaussian Splatting 기법을 응용하여 적용한다. 이 과정에서 반사도(Reflectivity) 데이터를 Ground Truth로 활용하였다. 포인트 클라우드를 복셀(voxel) 단위로 나누어 처리함으로써 특정 부분의 mesh 만 선택적으로

수정하거나 최적화할 수 있도록 설계하였다. 기존의 단순 박스 모델링과 달리, 구조물의 미세한 굴곡을 반영하여 산란(Scattering) 특성 시뮬레이션의 정확도를 높인다.



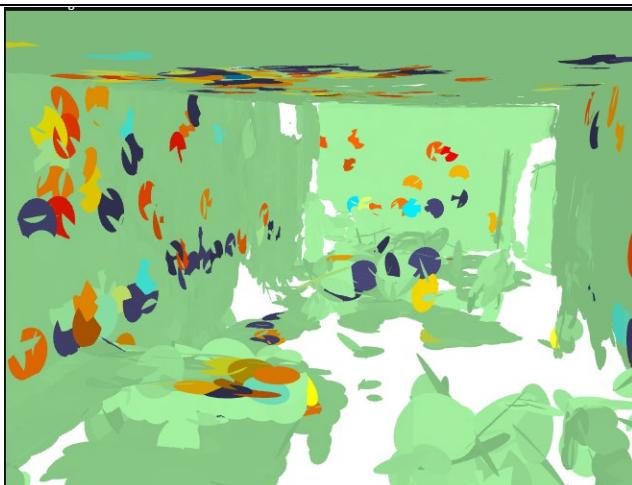
[Figure 2.] 포인트 클라우드 voxelization 을 통해 gaussian fitting 으로 3D mesh 모델을 형성하여 특정 부분의 mesh 를 수정할 수 있도록 하였다.

2.3 실측 채널 기반 Material Parameter 보정

제작된 3D 맵의 통신 신뢰도를 높이기 실제 전파 측정 데이터와 시뮬레이션 데이터를 일치시키는 보정 과정을 수행한다. USRP 2922 장비를 이용하여 특정 지점에서의 채널 임펄스 응답(CIR)을 실측하고 이를 시뮬레이션 결과와 비교한다.

보정과정은 실측 파워와 시뮬레이션 예측 값 사이의 평균 제곱 오차 (MSE)를 최소화하는 것을 목표로 하여, 다음과 같은 비용함수 $J(\theta)$ 를 정의한다.

$$J(\theta) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_{meas,i} - P_{digi,i}(\theta))^2$$



[Figure 3.] Material parameter 를 실측 채널을 ground truth 로 하여 시뮬레이션 채널 데이터를 ground truth 에 fitting 하도록 Gradient Descent 로 계산하였다.

이후 경사 하강법 (Gradient Descent) 업데이트 식 $\theta(t+1) = \theta_t - \eta \cdot \nabla_{\theta} J(\theta_t)$ 을

통해 각 구조물의 재질 파라미터인 유전율(ε)과 도전율(σ)을 최적화하여 시뮬레이션 데이터를 실측 값에 피팅한다.

III. 결론

본 연구에서는 LiDAR 기반 포인트 클라우드와 실측 채널 데이터를 결합하여 전파 환경을 높은 정확도로 재현할 수 있는 고현실성 디지털 트윈 제작 프로세스를 제안하였다. 본 기술을 통해 구축된 맵은 기존 방식보다 높은 환경 일치도를 보이며, 6G 무선 통신망 설계 및 최적화 연구에서 데이터를 신뢰성 있게 복제(Reproduce)할 수 있는 핵심 인프라로 활용될 수 있다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2024년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원(No. RS-2024-00428780, 6G-클라우드 리더십구축을 위한 교육 연구 오픈 허브)과 2023년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원(No. RS-2023-00395824)의 지원을 받아 수행된 연구임

참 고 문 헌

- [1] Hoydis, Jakob, et al. "Learning radio environments by differentiable ray tracing." IEEE Transactions on Machine Learning in Communications and Networking (2024).
- [2] Hoydis, Jakob, et al. "Sionna RT: Differentiable ray tracing for radio propagation modeling." 2023 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps). IEEE, 2023.
- [3] Ruah, Clement, et al. "Calibrating wireless ray tracing for digital twinning using local phase error estimates." IEEE Transactions on Machine Learning in Communications and Networking (2024).