

몰입형 홀로그래픽 통신을 위한 자유공간 광학 기반 통신 기법

이정범, 김건, 이우진, 오승현, 이상현

고려대학교

{felix9698, imgunkim99, mekdugi, seunghyunoh, sanghyunlee}@korea.ac.kr

FSO Transmission for Immersive Holographic Communication

Lee Jungbum, Kim Gun, Lee Wookjin, Oh Seunghyun, Lee Sang Hyun

Korea Univ.

요약

본 논문에서는 WLAN 표준 기반 자유공간 광(FSO) 전송을 활용한 종단 간(end-to-end) 몰입형 홀로그래픽 통신 프레임워크를 제시한다. 자체 구축된 디지털 트윈 환경으로부터 생성된 컬러 3D 홀로그래픽 데이터를 광 반송파에 변조하고, Radio-over-FOO 링크를 통해 전송한 후, 실질적인 몰입 경험을 위해 VR 글래스에서 시각화하였다. 시스템 성능은 송신 레이저 출력 및 변조 방식 변화에 따른 비트 오류율(BER)과 처리량 측면에서 평가하였다. 실험 결과, 제안된 프레임워크는 WLAN 표준 BER 요구조건을 충족하면서 VR 디스플레이 상에서 완전한 3D 홀로그래픽 장면을 복원할 수 있음을 확인하였으며, 이를 통해 FSO 링크 기반 홀로그래픽 통신의 실용적 구현 가능성을 입증하였다.

I. 서론

홀로그래픽 통신은 원격 사용자가 현실적인 공간 구조와 깊이감을 갖춘 3차원 장면을 인지할 수 있도록 함으로써 몰입형 서비스를 구현한다 [1]. 그러나 컬러 3D 포인트 클라우드와 같은 체적 데이터 표현은 본질적으로 데이터 집약적이므로, 기존의 무선주파수(RF) 시스템으로는 상당한 압축이나 품질 손실 없이 고품질 홀로그래픽 데이터를 연속적으로 전송하기 어렵다 [2]. 자유공간 광(FOO) 통신은 높은 반송파 주파수 특성으로 인해 THz 대역의 광대역폭과 무허가 운용이 가능하여 유망한 대안으로 주목받고 있다 [3]. FSO는 고속 무선 시스템 분야에서 광범위하게 연구되어 왔으나, 홀로그래픽 통신에 대한 적용은 충분히 탐구되지 않은 실정이다. 이에 본 논문에서는 FSO 링크를 통한 3D 홀로그래픽 콘텐츠의 종단 간 통신을 위한 새로운 프레임워크를 제안한다. 제안된 프레임워크는 디지털 트윈으로부터 생성된 컬러 3D 포인트 클라우드 데이터를 전송하며, 복원된 콘텐츠는 가상현실(VR) 글래스를 통해 시각화된다. 기하학적 좌표와 반사 강도만을 포함하는 기존의 포인트 클라우드와 달리, 제안 기법은 몰입형 장면 표현을 지원하기 위해 포인트별 색상 속성을 포함한다. 각 컬러 포인트는 전송의 기본 단위로 활용되며 WLAN 표준에 따라 패킷화된다. 데이터 스트림은 RF 신호가 광 반송파에 변조되는 FSO 채널을 통해 전송된다. 이에 대한 성능 평가를 위해 송신 레이저 출력 변화에 따른 비트 오류율(BER) 및 처리량 관점에서 링크 성능을 정량화하였다. 또한, 홀로그래픽 품질을 평가하기 위해 점진적 프레임 완성 주기를 분석하였다.

II. 본론

1. 프레임워크 소개

본 절에서는 FSO 링크를 통한 홀로그래픽 영상 전송을 위한 테스트베드 구조를 제시한다. 그림 1은 전체 실험 구성을 나타낸다. 홀로그래픽 데이터는 실제 실외 환경을 모사한 그림 2의 디지털 트윈 내에서 수집된다. 생성된 데이터는 변조되어 FSO 송신기를 통해 전송된다. FSO 수신기에서 광 수신 및 복조가 이루어진 후, 복원된 콘텐츠는 3D VR 디스플레이를 통해 시각화된다. 본 디지털 트윈 환경에서는 공공 데이터셋의 5미터 해상도 고도 지도를 활용하여 고려대학교 캠퍼스를 모델링하였으며, 건물을 포함한 주요 지형적 특징은 수동으로 구현하였다. 해당 환경 내의 시뮬레이

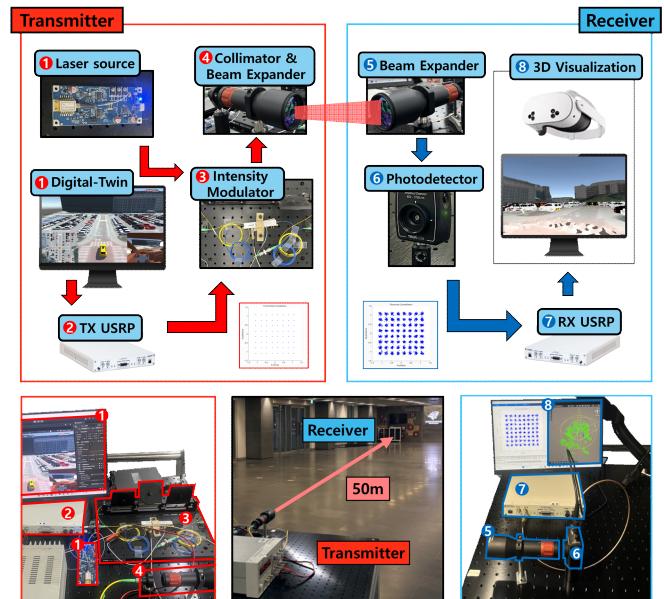


그림 1. 송수신 시스템 요소 및 50m 실내 FSO 링크 테스트베드 구성

이션 LiDAR는 360° 수평 시야각을 스캔하면서 텍스처가 적용된 장면 표면으로부터 각 포인트의 공간 좌표와 색상 정보를 획득하여 홀로그래픽 데이터로서 컬러 3D 포인트 클라우드를 구성한다.



그림 2. 고려대학교 이공계 캠퍼스 디지털 트윈

송신단에서는 호스트 PC가 3D 그래픽 엔진인 Unity를 실행하여 디지털 트윈을 운영하고 홀로그래픽 데이터를 생성한다. 생성된 데이터는 IEEE

802.11 WLAN 표준에 따라 패킷화되어 송신 USRP(NI USRP-2944R)로 전달된다. 송신 USRP는 패킷화된 데이터를 기저대역 신호로 변환하고 RF 신호를 생성하며, 이 RF 신호는 자유공간 전송을 위해 레이저 광원으로부터 출력되는 1564 nm 파장의 광 반송파를 세기 변조하는 데 사용된다. 빔 발산으로 인해 자유공간 전파 거리에 따른 광 전력 손실이 발생하므로, 콜리메이터를 통해 빔을 정형하고 빔 확장기(Thorlabs GBE10-C)를 이용하여 빔 직경을 확대함으로써 50 m 링크에서 광 전력을 유지한다. 수신단에서는 빔 확장기가 먼저 입사되는 빌산 광 빔을 집광하여 광검출기에 접속시킨다. 광검출기는 수신된 광 신호를 RF 신호로 변환하고, 수신 USRP(NI USRP-2944R)에서 복조하여 기저대역 신호를 복원한다. 복원된 데이터는 물입형 홀로그래픽 시각화를 위해 VR 글래스에 표시된다.

2. 프레임워크 성능 평가

본 절에서는 제안된 프레임워크 하에서 물입형 홀로그래픽 통신의 시스템 수준 성능을 평가한다. 실험 파라미터는 표 1에 요약하였다.

표 1. 프레임워크 실험 파라미터

WLAN 표준 파라미터	
WLAN 표준	IEEE 802.11a
부반송파 개수	64
중심 주파수	200 MHz
채널 대역폭	20 MHz
EVM 제한	-13 dB (QPSK) -19 dB (16-QAM) -25 dB (64-QAM)
LiDAR 상세 스펙 (시뮬레이션)	
수직/수평 시야각	40° [-25°, 15°] / 360°
수직/수평 해상도	0.2° / 0.1°
탐지 거리	[0, 300] m

먼저 3D 포인트 클라우드 전송을 위한 FSO 링크 성능을 물리 계층 관점의 성능 확인을 위해 변조 방식별로 분석한다. 그림 3은 QPSK, 16-QAM, 64-QAM 변조 방식에 대해 송신 레이저 출력에 따른 비트 오류율(BER) 및 처리량을 나타낸다. BER은 측정된 오류 벡터 크기(EVM) 값으로부터 추정하였으며 [5], 처리량은 초당 성공적으로 전송된 컬러 3D 포인트 수를 나타내는 초당 포인트 수(pps)로 정량화하였다. 송신 레이저 출력이 증가함에 따라 BER은 감소하고 처리량은 부호율 제한 최댓값에 수렴한다. 그 결과, QPSK는 2 dBm에서 BER 요구조건을 충족하지만 상대적으로 낮은 1.2×10^5 pps의 처리량을 달성하는 반면, 64-QAM은 3.8×10^5 pps의 처리량을 달성하지만 7 dBm을 초과하는 송신 출력을 필요로 한다. 10~11 dBm 부근에서 관측되는 미세한 성능 저하는 광 단말의 진동으로 인한 지향 오차에 기인한 것으로 판단된다.

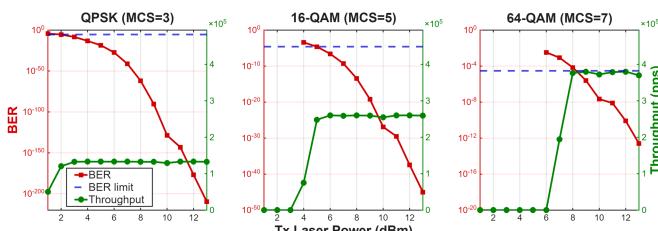


그림 3. 제안된 프레임워크의 BER 및 처리량 관점에서의 성능

한편, 응용 계층 관점의 성능 확인으로서, 복원 품질은 송신 레이저 출력

수준 변화에 따른 연속적인 전송 주기에 걸친 프레임 복원을 시각화한 히트맵을 통해 추가로 평가하였다. 그림 4는 송신단의 반복 횟수에 따른 주기당 데이터 수신 완성도를 히트맵 형태로 나타낸다. 해당 그림에서 색상 강도는 프레임 내 전체 포인트 수 대비 수신된 포인트 수의 비율로 정의되는 포인트 클라우드 완전성을 나타낸다. QPSK는 전체 출력 범위에서 장면 완성이 3주기 이상이 소요되는 반면, 64-QAM은 7 dBm을 초과하는 송신 출력 수준에서 2주기 이내에 데이터 수신 완전성을 달성한다.

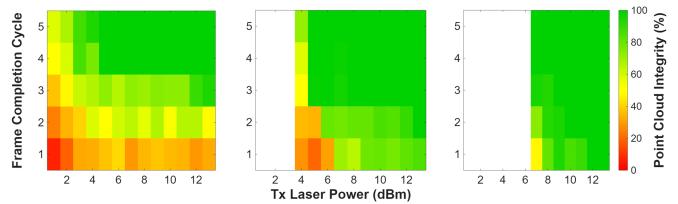


그림 4. 제안된 프레임워크의 반복 횟수 당 데이터 수신 완성도

이러한 결과는 제안된 테스트베드 환경에서 FSO 링크를 통한 완전한 프레임 복원을 갖춘 홀로그래픽 통신이 실현 가능함을 나타낸다.

III. 결론

본 시연에서는 50 m FSO 링크를 통해 디지털 트윈으로부터 VR 글래스 까지의 종단 간 홀로그래픽 통신 프레임워크를 제시하였다. 실험 결과, 각 변조 방식에 대해 정해진 수신 주기 이내에 완전한 3D 홀로그래픽 프레임 복원이 달성됨을 확인하였다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2025년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (RS-2025-00563388).

참 고 문 현

- [1] A. T. Hinds et al., "Immersive media and the metaverse," IEEE Commun. Mag., vol. 61, no. 9, pp. 48–54, Sep. 2023.
- [2] E.-C. Strinati et al., "6G: The next frontier: From holographic messaging to artificial intelligence using subterahertz and visible light communication," IEEE Veh. Technol. Mag., vol. 14, no. 3, pp. 42–50, Sep. 2019.
- [3] G. Park et al., "Free-space optical communication technologies for next-generation cellular wireless communications," IEEE Commun. Mag., vol. 62, no. 3, pp. 24–30, Mar. 2024.
- [4] IEEE, "Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications," pp. 1–3534, 2016.
- [5] J.-M. Kim et al., "Demo abstract: WLAN standard-based noncoherent FSO transmission over 100m indoor and outdoor environments," in Proc. IEEE Conf. Comput. Commun. Workshops (INFOCOM WKSHPS), 2021, pp. 1–2.