

VR 기반 다감각 피드백 로봇 원격제어 시스템 연구

김강현^{1,2}, 전세웅², 김원하¹
경희대학교¹, 한국전자기술연구원²

khkim1207@keti.re.kr, daniel@keti.re.kr, wonha@knu.ac.kr

VR-Based Teleoperation with Multimodal Feedback for Robots

Kang-hyun Kim^{1,2}, Sewoong Jun², Wonha Kim¹
Kyung hee University¹, Korea Electronics Technology Institute²

요약

로봇 원격제어는 직접적인 제어와 더불어 모방 학습을 위한 데이터 수집 등의 목적으로 활발히 연구되고 있는 분야이다. 그러나 Master-Slave 방식이나 핸드 트래킹 기반 VR 시스템과 같은 기존 연구들은 안정성과 확장성, 정밀성 측면에서 한계를 나타낸다. 본 논문에서는 원격 환경에서 로봇의 직관적이고 안정적인 제어를 위한 다감각 피드백 시스템을 제안한다. 제안하는 시스템은 상용 VR HMD 와 컨트롤러를 사용하여 복합적인 입력을 처리하고, WebRTC 프로토콜을 통해 로봇에 부착된 스테레오 카메라의 3D 영상과 현장 음향을 저지연으로 전송하여 높은 시청각적 몰입감을 제공한다. 특히 로봇이 받는 물리적 부하를 VR 컨트롤러의 햅틱 피드백으로 변환하여 사용자에게 전달함으로써, 원격 환경에서도 촉각적 인지를 기반으로 한 정밀 작업이 가능하도록 설계하였다.

I. 서 론

원격제어에 대한 연구는 원격 조작을 모방 학습을 위한 데이터 수집을 위해 최근 몇 년간 많은 관심을 받고 있다. 초기 연구는 주로 Master-Slave 기반의 원격제어 작업으로 진행되었다. 이후에는 모바일로봇을 추가하거나 VR 기기를 통해 손으로 휴머노이드를 다양하게 제어하며 지속적으로 발전하고 있다.

Master-Slave 기반의 연구 중 대표적인 연구 GELLO[1]는 Master-Slave 기반 제어로 복잡한 역학구성을 풀 필요 없이, 각각의 제어를 통해 직관적이고 안정적인 조작이 가능하다. 하지만 Master 와 Slave 의 1:N 스케일링 방식은 N의 차이가 클수록 조작이 어려워진다. 또한 로봇에 맞는 Master 기기가 필요하기 때문에 로봇 종속성이 생겨 확장성이 떨어진다.

OpenTelevision[2]은 Stereo Vision 카메라에 Pan-Tilt를 장착하고 그 정보를 VR을 통해 받으며 시각적 피드백을 크게 개선하였고, 컨트롤러나 Master 기기 없이 손추적만을 이용하여 확장성과 편의성을 크게 개선하였다. 하지만 버튼과 같은 물리적 입력이 부족하여 복잡한 작업에 제약이 있으며, 추적 범위 밖 손 위치 추적이 어려워 제어 안정성이 떨어지고, 또한 소리나 촉각 피드백이 없어 미시적 작업 정밀도가 낮다는 한계도 존재한다.

이를 해결하기 위해 VR 컨트롤러를 입력 디바이스로 택하여 버튼·트리거·그립·조이스틱 등을 통해 복잡한 입력을 분산시키고, 시각, 청각, 촉각의 다감각 피드백을 활용하여 로봇을 원격에서도 안정적으로 제어하는 원격작업 알고리즘을 제안한다.

II. 본 론

2.1. Stereoscopic 3D 시각 피드백

인간은 좌우 약 6.5 cm 떨어진 두 눈을 통해 서로 다른 영상을 받아들이며, 뇌의 시각 피질에서 이를 융합하여 깊이감을 지각한다. 이러한 양안 시차(binocular disparity)와 함께 눈의 수렴(convergence) 및 초점 조절(accommodation) 기전이 결합되어 3 차원 공간 지각이 가능하다. 스테레오스코픽 디스플레이는 이러한 생리적 메커니즘을 인공적으로 재현하여 사용자가 가상의 3D 영상을 현실처럼 지각할 수 있도록 한다.

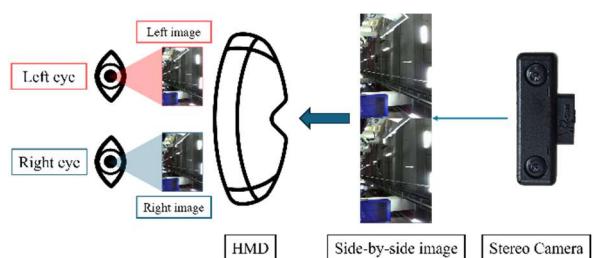


Fig. 1 HMD stereoscopic

본 연구에서 사용하는 Meta Quest3[3]는 Head-Mounted Display (HMD)로 좌-우 독립 시점을 생성하여 각각의 눈에 영상을 분리 투사함으로써 몰입형 입체 경험을 제공한다. 로봇 현장에서 획득한 스테레오 카메라 영상을 WebRTC 기반으로 전송하고, HMD에서는 전송 받은 이미지를 반으로 나누어 내부의 듀얼 디스플레이 및 광학 렌즈를 통해 좌안-우안에 각각 투사하게 되면 사용자는 깊이감이 있는 가상의 3D 영상을 실시간으로 스트리밍할 수 있다.

2.2. 원격 제어 시스템

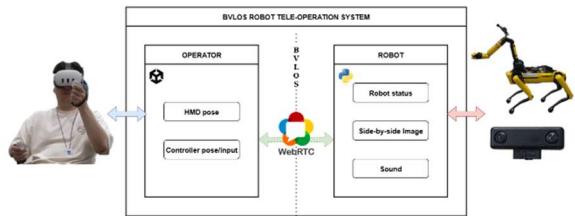


Fig. 2 시스템 구조도

본 연구에서는 원격 환경에서도 실시간 원격제어를 위해선 현장감과 깊이감, 저지연이 중요한 요소로 작용하게 된다. 실시간성을 위해 WebRTC 프로토콜을 이용하여 로봇과 Unity VR 시스템을 P2P로 연결하여 저지연 환경을 구성하였고, VR에서 실제 현장에서의 소리를 청각적으로 전달받고, 로봇에서 발생하는 부하를 VR 컨트롤러의 진동을 통해 전달받아 가상환경에서도 현장감을 느낄 수 있게 구성하였다.

VR 기기는 HMD 와 컨트롤러의 6-DoF(Degrees of Freedom) 자세(pose)정보와 버튼, 축, 그립, 트리거와 같은 정보를 전송한다. 이러한 입력 정보를 통해 이동 로봇과 장착된 다관절로봇을 동시에 움직일 수 있고, 특정 입력을 유지할 때만 로봇이 움직이도록 설계하여(데드맨 스위치, dead-man's switch) 조작 안정성을 높였다.



Fig. 3 Meta Quest3 VR Controller

이동형 로봇의 경우 대부분 Fig.3의 (a)와 (b) 아날로그 스틱에 x, y, theta 이동을 맵핑하여 정밀하게 조작할 수 있지만, 다관절 로봇의 경우에는 직관적인 조작을 위해 VR 좌표계에서의 컨트롤러 좌표를 로봇 좌표계로 변환하여 누적 방식으로 명령을 전달한다.

VR의 원점은 시작 위치의 바닥으로 고정되며, 필요에 따라 (h)버튼을 통해 재설정이 가능하다. 컨트롤러는 이 원점에 따른 상대 좌표를 반환한다. 헤드 트래킹은 HMD의 orientation 좌표를 받아 Pan-tilt 모듈에 그대로 반영하여 카메라 시점을 동기화한다.

컨트롤러 위치 처리 과정은 (f), (k)을 테드맨 스위치로 적용하여 누르면 컨트롤러의 현재 위치와 로봇의 현재 위치를 저장하고 컨트롤러의 상대 위치를 계산하여 스위치를 누르고 있는 동안 매 step마다 원점에 대한 상대 좌표를 누적한다. 이 값을 테드맨 스위치가 작동하는 동안, 로봇 현재 좌표에 누적하여

VR에서 움직이는 것과 동일하게 로봇을 정밀 제어할 수 있다. 또한 VR 컨트롤러에서는 로봇 부하 상태에 따라 진동 피드백을 생성한다. 로봇 부하에 따라 진동을 생성하여 Fig.4와 같이 사용자가 적절한 강도로 물건을 집거나 유지할 수 있도록 도와준다.



Fig. 4 정밀 제어를 통한 물 끓기

III. 결 론

본 연구에서는 원격 환경에서의 효과적인 로봇 제어를 목표로, 다감각 피드백을 활용한 VR 기반 원격제어 시스템을 설계 및 구현하였다. 제안된 시스템은 WebRTC를 이용한 P2P 통신으로 저지연 실시간성을 확보하였으며, 스테레오 비전을 통한 입체 시각, 실시간 음향을 통한 청각, 그리고 로봇의 부하와 연동된 햅틱 피드백을 통한 촉각 정보를 운용자에게 통합적으로 제공한다. 이를 통해 기존 원격제어 시스템의 한계를 극복하고, 운용자의 현장감과 몰입도를 극대화하여 복잡하고 정밀한 작업의 안정성을 향상시켰다. 또한 테드맨 스위치와 같은 안전장치를 적용하여 제어 안정성을 높였다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 산업통상자원부와 한국산업기술진흥원의 “지역혁신클러스터육성(R&D, P0026052)”사업의 지원을 받아 수행된 연구결과임.

참 고 문 헌

- [1] P. Wu, Y. Shentu, Z. Yi, X. Lin, and P. Abbeel, "Gello: A general, low-cost, and intuitive teleoperation framework for robot manipulators," in *2024 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2024, pp. 12156–12163.
- [2] X. Cheng, J. Li, S. Yang, G. Yang, and X. Wang, "Open-television: Teleoperation with immersive active visual feedback," *arXiv preprint arXiv:2407.01512*, 2024.
- [3] Meta, "Meta Quest 3: All-in-One VR Headset," 2025. <https://www.meta.com/kr/quest/quest-3/>.