

Radiance Fields for Robotic Teleoperation 연구 분석 보고서

1. 연구 개요

1.1 연구 배경

연구 기관: ETH Zurich Robotic Systems Lab

저자: Maximum Wilder-Smith, Vaishakh Patil, Marco Hutter

발표: arXiv:2407.20194v2 [cs.RO] (2025년 5월)

1.2 연구 동기

전통적인 로봇 원격 조작(teleoperation) 시스템은 다음과 같은 근본적인 딜레마에 직면해 있습니다:

- 직접 카메라 스트림:** 고화질이지만 기동성 제한
- 재구성 기반 접근법:** 제어 가능하지만 낮은 충실도

본 연구는 이러한 한계를 극복하기 위해 Neural Radiance Fields(NeRF)와 3D Gaussian Splatting(3DGS)을 활용한 혁신적인 시각화 파이프라인을 제안합니다.

2. 핵심 기술 혁신

2.1 주요 기여점

- 온라인 Radiance Field 훈련:** 다중 카메라의 실시간 데이터를 활용
- 다양한 방법 지원:** NeRF, 3DGS 등 여러 radiance field 기술 통합
- VR 시각화 시스템:** Meta Quest 3을 활용한 몰입형 인터페이스

2.2 시스템 아키텍처

3단계 파이프라인:

로봇+센서 → 재구성 방법 → 시각화

테스트된 로봇 구성:

- 정적 암:** Franka Panda (높은 포즈 정확도)
- 모바일 베이스:** Anybotics Anymal (넓은 탐사 범위)
- 모바일 암:** DynaArm + Anymal (최적 균형)

3. 실험 결과 및 성능 분석

3.1 화질 비교 (PSNR/SSIM/LPIPS)

데이터셋	방법	PSNR ↑	SSIM ↑	LPIPS ↓
정적 압	Voxblox	15.42	0.50	0.55
	NeRF	18.07	0.53	0.49
	3DGS	34.12	0.93	0.23
모바일 베이스	Voxblox	6.85	0.41	0.81
	NeRF	25.55	0.87	0.20
	3DGS	20.18	0.79	0.40
모바일 압	Voxblox	16.94	0.51	0.53
	NeRF	22.16	0.65	0.15
	3DGS	24.59	0.74	0.21

3.2 성능 메트릭

방법	훈련 속도 (ms/iter)	Voxblox 품질 도달 시간	렌더링 속도
Voxblox	1,206 ms	-	30 FPS
NeRF	36 ms (20배 빠름)	7.0초	0.98 FPS
3DGS	35 ms (20배 빠름)	7.0초	151 FPS

4. 사용자 연구 결과

4.1 참가자 특성

- 참가자 수: 20명
- 연령대: 22-32세 (평균 26세)
- 성별: 여성 5명, 남성 15명
- ROS 경험: 전원 숙련자
- VR 경험: 5명만 경험 보유

4.2 주요 발견사항

인식 품질:

- VR NeRF > RViz NeRF > Voxblox
- VR 시스템이 같은 데이터임에도 불구하고 높은 품질 인식

텔레오퍼레이션 작업별 선호도:

- 이동 작업: Voxblox 선호 (공간 이해 용이성)

- **조작 작업:** NeRF 선호 (세밀한 디테일 표현)

사용성: VR 시스템이 2D 인터페이스보다 일관되게 선호됨

5. 기술 구현 상세

5.1 NerfStudio-ROS 통합

- **커스텀 컴포넌트:** Dataset, DataLoader, DataParser
- **센서 관리:** 다중 카메라 실시간 데이터 처리
- **ActionServer:** 렌더링 요청 처리 및 클라이언트 관리

5.2 시각화 옵션

RViz 플러그인:

- 동적/연속 렌더 모드
- 점진적 해상도 렌더링 (10% → 50% → 100%)
- 깊이 기반 폐색 처리

VR 시스템:

- 2.5D 핸드헬드 패럴랙스 뷰어
- 360° 몰입형 구형 렌더
- 실시간 로봇 모델 시각화

6. 오픈소스 생태계

6.1 GitHub 저장소 구조

radiance_field_ros (메인 패키지):

```
bash

radiance_teleoperation/
├── src/           # 핵심 ROS 노드
├── config/        # YAML 설정 파일
├── launch/        # ROS 런치 파일
└── scripts/       # 헬퍼 스크립트
```

unity_ros_teleoperation (VR 시스템):

- 14개 핵심 컴포넌트
- Meta Quest 3 최적화
- TCP 기반 ROS 통신

6.2 설치 및 사용

```
bash

# 환경 설정
conda create --name nerfstudio -y python=3.8
pip install pytorch==2.1.2 torchvision==0.16.2 pytorch-cuda=11.8

# 패키지 클론 및 빌드
git clone https://github.com/leggedrobotics/radiance_field_ros.git
catkin build nerf_teleoperation

# 사용법
ns-ros <model-name> --config_path <config_file> # 온라인 훈련
ns-ros-save --config_path <config_file> # 데이터 수집
```

7. 특허 회피 전략 분석

7.1 현재 접근법의 한계

연구에서 사용된 기술들이 기존 특허와 충돌할 가능성이 있어, 다음과 같은 전략적 접근이 필요합니다:

7.2 제안된 "도약 및 요새화" 전략

1단계: 핵심 회피 (Foundational Avoidance)

- 아키텍처 변경: 클라우드 → 엣지 컴퓨팅 전환
- 알고리즘 대체: 3DGS → Neural SDF 적용

2단계: 기술적 도약 (Innovative Differentiation)

- 예측 렌더링: AI 시선 예측을 통한 선택적 고해상도 렌더링
- 다중감각 융합: 시각+촉각+온도+압력 센서 통합

3단계: 독자 특허 요새화 (IP Fortification)

- 분산형 엣지 컴퓨팅 기반 실시간 시스템
- 사용자 시선 예측 기반 비대칭 렌더링
- 다중감각 융합 인터페이스

8. 개발 로드맵

8.1 단계별 계획 (16주)

Phase 1-2 (7주): 환경 설정 및 데이터 파이프라인 **Phase 3-4 (9주):** Radiance Field 통합 및 시각화 **Phase 5-7 (6주):** 성능 최적화 및 시스템 완성

8.2 성공 기준

- **품질:** NeRF PSNR > 20, 3DGS PSNR > 25
- **속도:** 3DGS 렌더링 > 100 FPS
- **사용성:** VR 인터페이스 선호도 > 70%

9. 결론 및 전망

9.1 연구 성과

1. **기술적 우수성:** Radiance Fields가 전통적 메쉬보다 일관되게 우수한 성능
2. **실시간 가능성:** 3DGS의 151 FPS 렌더링으로 실용적 적용 가능
3. **사용자 만족도:** VR 환경에서의 높은 몰입감과 직관적 조작

9.2 미래 응용 분야

- **산업 로봇 제어:** 정밀 조립 및 검사 작업
- **위험 환경 탐사:** 재해 현장, 우주 탐사
- **원격 수술:** 의료용 로봇 시스템
- **교육 및 훈련:** 시뮬레이션 기반 로봇 운용 교육

9.3 기술적 도전과제

- **실시간 성능 최적화:** 더욱 효율적인 알고리즘 개발 필요
- **하드웨어 요구사항:** 고성능 GPU 의존성
- **네트워크 지연:** 원격 환경에서의 통신 최적화

10. 권고사항

10.1 연구 개발팀을 위한 제언

1. **즉시 시작 가능:** 오픈소스 코드베이스 활용으로 빠른 프로토타이핑
2. **하드웨어 준비:** RTX 4080/4090급 GPU 필수
3. **법적 검토:** 특허 전문가와의 사전 상담 권장

10.2 상용화 전략

1. **차별화 기술 개발:** Neural SDF + 엣지 컴퓨팅 조합
2. **독자 특허 출원:** 핵심 혁신 기술에 대한 지적재산권 확보
3. **단계별 시장 진입:** 산업용 → 서비스용 → 소비자용

이 연구는 로봇학과 neural rendering의 융합 분야에서 중요한 이정표를 제시하며, 차세대 텔레오퍼레이션 시스템의 새로운 패러다임을 제시합니다.

