

[Study 2. 도진경] BecomingLit: Relightable Gaussian Avatars with Hybrid Neural Shading (1)

- Title) BecomingLit: Relightable Gaussian Avatars with Hybrid Neural Shading
- Publication) NeurIPS 2025
- Reference)
 - [project page](#) | [github](#) | [paper](#)

Abstract

1. Introduction

2. Related Works

3. Multi-View OLAT Dataset of Faces

4. Method

4.1 관련 원리

3D Gaussian Splatting

Physically-based Rendering

4.2 Geometry

4.3 Material

4.4 Optimization

4.5 Implementation Details

4.6 Differences to RGCA

5. Experiments

Abstract

- 고해상도의 3D Avatar 생성
 - 3D Gaussian primitive 기반의 relightable avatar 생성
 - hybrid neural shading 방법 사용하여 realistic relighting 구현
 - neural diffuse BRDF + 분석적 specular term 결합
- 다양한 조명/ 표정의 face dataset 수집

1. Representation

- : FLAME - 얼굴 motion, pose, texture 표현
- : Gaussian head avatar / Parametric expression model

2. Shading

- : 조명 변화를 얼굴에 표현
 - a. Hybrid neural shading
 - i. neural diffuse
 - ii. analytic specular
-

1. Introduction

- 3D 아바타에 새로운 환경의 조명을 적용해서 재구성하기 어려움.
 - 다양한 각도에서의 빛 정보가 있는 dataset이 없기 때문

1. OLAT 데이터셋 제안

- 다양한 각도에서 빛을 비추는 이미지 데이터
- 고해상도, 높은 frame rate, 다양한 인물

2. Relightable, Realistic 아바타 표현 방법 제안

- 3D Gaussian primitives 기반 아바타 표현
 - 빛과 색의 자연스러운 표현 (Gaussian)
 - 얼굴 표정/움직임의 자연스러운 표현 (Parametric head model + expression dynamics module)
- Hybrid Neural Shading 기반 고품질의 조명 표현
 - neural diffuse BRDF: diffuse reflection(확산 반사) 학습
 - analytical specular term: specular(반사광)을 물리 기반 모델로 분석

2. Related Works

- Human Head Modeling
 - **PCA-based 3DMM**
: 피부 주름 / 머리카락 등 디테일 표현 부족
 - **NeRF**
: 고해상도 표현 가능, geometry 추론 모델 불필요
: relighting 어려움, 연산량↑
 - **3D Gaussian Primitives**
: 상대적으로 높은 geometry 품질, 빠른 렌더링 지원
: but, 제한적인 relighting

→ 3D Gaussian Primitives에 material-aware shading을 결합
- Facial Appearance Capture & Neural Shading
 - 새로운 각도의 조명과 피부의 반사 표현 어려움
: 고주파 reflection 시 아티팩트 발생

→ diffuse는 neural +specular는 analytic specular 사용한 Hybrid Neural Shading 적용

3. Multi-View OLAT Dataset of Faces

- One-Light-At-a-Time
 - 조명·시점·표정이 분리된 얼굴 데이터셋 구축
- diffuse와 specular를 분리하여 사용
 - diffuse
: 방향 변화에 완만히 변함, 학습 가능
 - specular
: 특정 방향에서 급격히 반응
- Specular 반사의 특징
 - 방향 의존적이며, 고주파 신호
 - 표면 노멀 n
 - 시점 방향 v
 - 광원 방향 l

$$L_{spec} = f_{spec}(\mathbf{n}, \mathbf{v}, \mathbf{l}, \alpha)$$

Dataset	# IDs	# Views	# Lights	FPS	Resolution	Setup Cost
3DRFE [37]	23		only processed data			\$\$
Goliath [22]	4	144	460	9 (90) ¹	1334x2048	\$\$\$
Ours	10	16	40	72	2200x3208	\$

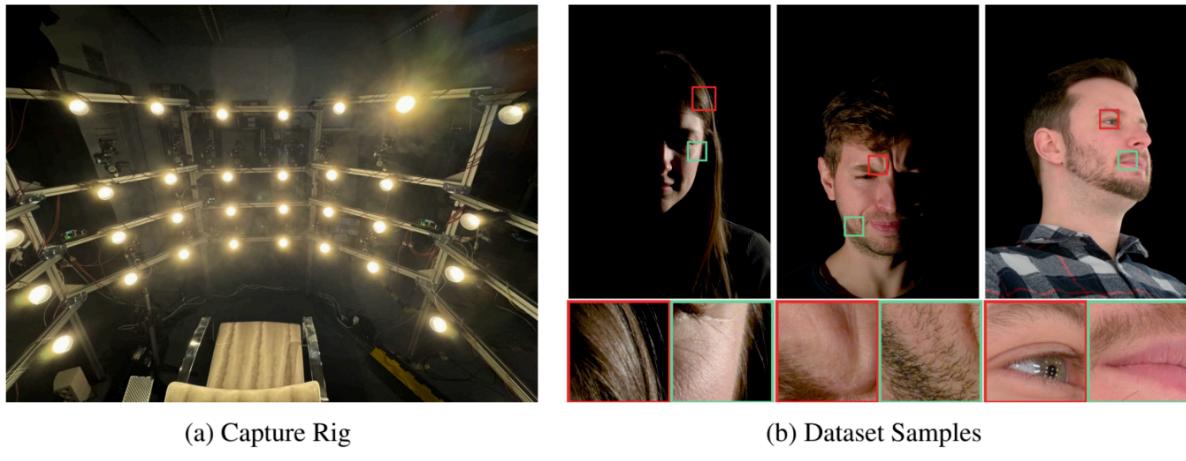


Figure 2: **OLAT Dataset:** (a) Our custom light-stage rig we used to capture (b) our dataset consisting of high-resolution, high frame rate, multi-view recordings of faces under both OLAT and fully-lit conditions.

4. Method

4.1 관련 원리

3D Gaussian Splatting

- 평균, 공분산, 불투명도로 3D 씬을 표현
 - 표면/볼륨 특징의 효율적인 표현 가능 (피부, 머리카락, 경계 표현)

Physically-based Rendering

- 카메라 센서에 빛이 들어오는 물리적 특성에 따른 이미지 렌더링 공식 적용
 - 특정 지점에 입사하는 빛(w_i)이 관찰자 방향(wo)으로 얼마나 반사되는지 결정
 - Lo: 카메라에 관찰된 반사적 특징

- Li: 새로운 조명 환경, x 포인트에서 w_i 방향으로 들어온 빛의 L
- fr: 복원하고자 하는 아바타의 metarial 정보

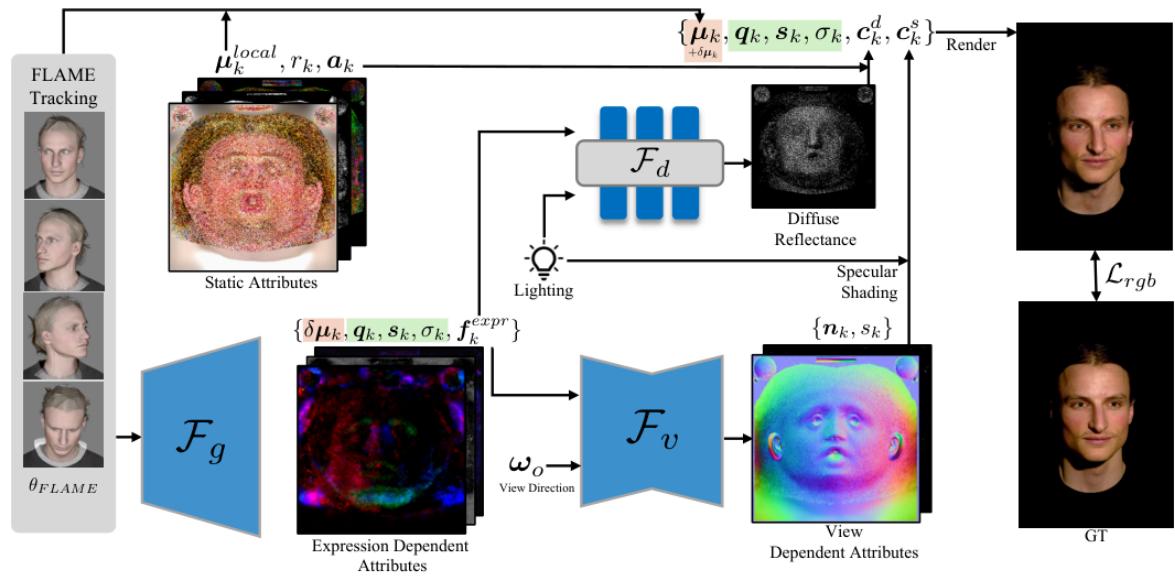
$$L_o(\mathbf{x}, \omega_o) = \int_{\Omega} f_r(\mathbf{x}, \omega_i, \omega_o) L_i(\mathbf{x}, \omega_i)(\omega_i \cdot \mathbf{n}) d\omega_i$$

4.2 Geometry

- 어느 위치에 Gaussian 점이 위치하는가를 정의
 1. 얼굴로부터 **FLAME** 파라미터 추출
 2. FLAME 파라미터를 사용하여 **gaussian** 특성을 변형
 3. Fg Renderer를 통해 **Gaussian** 특성을 2D UV map으로 projection

$$\{\delta \boldsymbol{\mu}, \mathbf{q}, \mathbf{s}, \sigma, \mathbf{f}^{expr}\}_{k=1}^M = \mathcal{F}_g(\theta_{FLAME})$$

3. 표정/포즈 변화 시, Gaussian Deformation으로 얼굴 구현



4.3 Material

항목	Diffuse	Specular
계산 방식	Fd 네트워크	수식
위치 결정	neural	analytic
방향성	약함	매우 강함
안정성	높음	매우 높음
relighting	제한	매우 강함

- **Neural Diffuse (Fd 네트워크 추정)**
 - 빛이 오는 방향, point의 재질에 따른 피부 표현을 함수로 학습
 - 저주파적 특성
- **Analytic Specular (물리적 정의 + Fv 네트워크 추정)**
 - view point와 빛의 방향에 따른 하이라이트(반사)의 위치와 세기를 정의
 - 고주파적 특성
 - 물리 기반 specular 함수
 - 하이라이트가 생기는 위치와 방향을 정의
 - '이 방향에서 빛이 오고, 이 방향에서 바라볼 때, 표면이 이 정도로 매끄러우면 하이라이트가 여기 생긴다'

- 광원 방향 / 시점 방향 / 표면 노멀의 정확한 기하 관계로 결정됨
 - **Fv 네트워크**
 - microfacet BRDF
 - view point에 따른 reflection의 세기, 미묘한 view-dependent 변화만 Fv 네트워크로 보정
-

4.4 Optimization

- 렌더링 결과 ≈ 실제 이미지가 되도록 최적화

$$\begin{aligned}\mathcal{L} &= \mathcal{L}_{rgb} + \mathcal{L}_{reg} \\ \mathcal{L}_{reg} &= \lambda_{normal}\mathcal{L}_{normal} + \lambda_{alpha}\mathcal{L}_{alpha} + \lambda_{scale}\mathcal{L}_{scale} + \lambda_{pos}\mathcal{L}_{pos}\end{aligned}$$

- Loss function
 - **L_rgb**
: Photometric Loss, 렌더링 결과와 실제 OLAT 이미지 간 색 차이
 - diffuse 학습(Fd), specular 세기 조정(Fv), Gaussian geometry 미세 보정
 - **L_reg**
: Gaussian geometry을 물리적으로 바르게 유지함.
 - L_normal
: Gaussian이 proxy geometry(FLAME)의 normal을 벗어나지 않게 고정
 - L_alpha
: Gaussian의 불투명도
 - L_scale
: Gaussian의 크기/모양을 초기값으로 유지, specular 안정성 확보
 - L_pos
: Gaussian의 3D 위치가 mesh 표면에 있도록 유지
 - 감마가 커지면 표현력 제한, 너무 작으면 붕괴

4.5 Implementation Details

- PyTorch + 커스텀 GPU 커널 (SLANG.D)
- Specular shading
 - : 커스텀 GPU 커널 (SLANG.D)
 - : 높은 성능, 정확도
- Gaussian Rendering
 - : gsplat 사용
 - : 실시간에 가까운 처리 속도
- 512×512 texel 해상도
 - : 20만개의 gaussian 점으로 표현
- FLAME 2023 + 치아 추가
- 학습 해상도·시간·하드웨어
 - : 1100×1604 , 250k iterations, batch size 4, ~30 hours on RTX A6000

4.6 Differences to RGCA

- RGCA
 - VAE 기반
 - 특정 identity 의 사람에 대한 latent space 추출 및 추정
(사람마다 encoder 재학습 필요)
 - 한 사람을 잘 표현하는 목적으로 사용
- BecomingLit
 - FLAME 기반 공통 expression space 사용
(모든 얼굴에 사용 가능한 공통된 표정 파라미터 표현)
 - general하게 조명·표정·시점을 바꿀 수 있는 아바타 생성

5. Experiments

- 한계
 - 새로운 identity의 아바타 생성을 위해 OLAT 데이터 생성 + 재학습 필요
- 제안한 Gaussian + Hybrid Neural Shading 방식이 안정적, 사실적 표현 가능
 - (1) 재조명, (2) 시점 변경, (3) 애니메이션 측면
- [Figure 4] Relighting 결과 비교
 - 하이라이트 위치 정확도 ▲
 - 자연스러운 하이라이트 표현
 - 조명 변화에 independent한 얼굴 색
 - : diffuse(얼굴 고유 색) 와 specular(조명 방향에 따른 반사 방향) 분리
- [Figure 5] Comparison of Intrinsic Decomposition
 - 성분별 분리 및 표현 정확도
- [Figure 7]
 - (Left) 다양한 방향, 세기의 광원이 존재하는 environment map에서의 높은 품질 확보
 - (Right) (2) 단일 영상(monocular video)만으로도 애니메이션 가능