JDCS
디지털콘텐츠학회논문지
Journal of Digital Contents Society
Vol. 27, No. 10, pp. 3023-3035, Oct. 2026

Check for updates

3D Gaussian Splatting 장면의 지지면 기하 편집을 통한 경사 지형 생성

이 제 민[1] · 김 정 현[1] · 강 형 준[2] · 이 동 희[2] · 이 주 영[2] · 김 지 형[3] · 류 훈[3] · 최 동 수[3] · 김 영 원[3*]
[1]국립금오공과대학교 소프트웨어공학과 석사과정
[2]국립금오공과대학교 컴퓨터공학부 소프트웨어전공 학사과정
[3]국립금오공과대학교 컴퓨터공학부 교수

Sloped Terrain Generation Through the Geometric Editing of Support Surfaces in 3D Gaussian Splatting Scenes

Jemin Lee[1] · Jeonghyeon Kim[1] · Hyeongjun Kang[2] · Donghee Lee[2] · Juyoung Lee[2] · Jihyung Kim[3] · Hoon Ryu[3] · Dong-Soo Choi[3] · Youngwon Kim[3*]

[1]Master's Course, Department of Software Engineering, Kumoh National Institute of Technology, Gumi 39177, Korea
[2]Undergraduate Student, Software Major, School of Computer Engineering, Kumoh National Institute of Technology, Gumi 39177, Korea
[3]Professor, School of Computer Engineering, Kumoh National Institute of Technology, Gumi 39177, Korea

[요 약]

본 연구는 학습된 3D Gaussian Splatting(3DGS) 장면을 재학습하지 않고, 지지 평면과 편집 ROI에서 선택한 Gaussian의 위치·회전·스케일을 직접 보정하여 경사 지형을 생성한다. LEGO, Hotdog, Ship에 10°–40° 경사를 적용한 12개 조건에서 NaN은 발생하지 않았고, 평면 적합 오차는 0.5767°–3.4123°, 편집 시간은 0.20–1.42초였다. LEGO 30°에서 회전 보정은 회전 변환 일치 오차를 29.9870°에서 0.0014°로 감소시켜 목표 방향과의 일치를 확인하였다. 투영 경계 alpha 불연속도는 스케일 보정 후 LEGO 17.73%, Hotdog 2.70%, Ship 25.13% 증가하였다. Garden에서는 ROI 확장이 높이 proxy RMSE와 3차원 경계 변위 불연속도를 일관되게 개선하지 못했고 일부 조건은 객체 보호 영역을 침범하였다. 따라서 본 방법은 명확한 지지면에 낮은 비용으로 안정적으로 적용됐으나, 최종 품질은 ROI 선택, 객체 보호 및 고경사 스케일 처리에 의해 결정된다.

[Abstract]

This study proposes retraining-free slope generation by directly correcting the position, rotation, and scale of support-surface Gaussians. Under 12 conditions applying 10°–40° slopes to LEGO, Hotdog, and Ship, NaN values did not occur, fitted plane error ranged from 0.5767° to 3.4123°, and editing duration was 0.20–1.42 seconds. For LEGO at 30°, rotation correction reduced the rotation-transform consistency error from 29.9870° to 0.0014°, in agreement with the target direction. Tangential scale correction increased projected-boundary alpha discontinuity by 17.73%, 2.70%, and 25.13% in LEGO, Hotdog, and Ship, respectively. In Garden, Region of Interest (ROI) expansion did not consistently improve the height proxy Root Mean Square Error (RMSE) or three-dimensional boundary displacement discontinuity, and some conditions intruded into protected object regions. Therefore, the method resulted in low computational cost and high numerical stability on clear support surfaces; however, the final quality of results depended on ROI selection, object protection, and high-slope scale handling.

색인어 : 3D Gaussian Splatting, 가우시안 편집, 그래픽스, 경사 지형 생성, 기하 변환
Keyword : 3D Gaussian Splatting, Gaussian Editing, Graphics, Sloped Terrain Generation, Geometric Transformation

http://dx.doi.org/10.9728/dcs.2026.27.10.3023

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-CommercialLicense(http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Received 04 August 2026; **Revised** 21 August 2026
Accepted 15 September 2026

***Corresponding Author; Youngwon Kim**

Tel: +82-54-478-7542
E-mail: kim01@kumoh.ac.kr

Ⅰ. 서 론

3D Gaussian Splatting(3DGS)은 다중 시점 영상으로부터 장면을 비등방성 Gaussian의 집합으로 표현하고, 이를 화면 공간에 빠르게 투영하여 고품질의 신규 시점 영상을 생성하는 방법이다. 높은 시각적 품질과 실시간에 가까운 렌더링 성능을 동시에 제공한다는 점에서 가상현실, 디지털 트윈, 게임, 로봇 시뮬레이션 등 다양한 분야에서 활용 가능성이 높다. 그러나 3DGS 장면은 삼각형 메시나 명시적인 지형 구조가 아니라 위치, 회전, 스케일, 불투명도 및 색상 정보를 가진 Gaussian 원시요소의 비정형 집합으로 구성된다. 이 때문에 특정 바닥을 들어 올리거나 평면 지지면을 경사면으로 변형하는 구조적 편집은 메시 기반 장면에 비해 직관적으로 수행하기 어렵다.

특히 3DGS 장면에서는 객체와 지지면이 명확하게 분리되어 있지 않으며, 객체와 바닥이 맞닿는 영역에서는 서로 다른 구조를 표현하는 Gaussian이 공간적으로 중첩될 수 있다. 이러한 상태에서 지지면 전체를 일괄적으로 변형하면 객체를 구성하는 Gaussian 일부가 지지면과 함께 이동하거나, 반대로 일부 Gaussian이 기존 위치에 남아 객체가 분리되거나 중첩된 형태로 보일 수 있다. 따라서 3DGS 지지면 편집에서는 단순히 Gaussian의 위치를 변경하는 것뿐 아니라, 객체 접촉 영역을 보호하고 실제로 변형할 영역을 적절히 제한하는 과정이 중요하다.

본 연구에서는 학습이 완료된 3DGS 장면에서 객체와 직접 접촉하지 않는 노출 지지면 영역을 선택하고, 해당 Gaussian의 위치, 회전 및 스케일을 조정하여 평면 지지면을 경사면으로 변형하는 절차를 검증한다. 위치 보정을 통해 선택된 영역에 목표 높이 변화를 적용하고, 회전 보정을 통해 Gaussian의 방향을 경사면의 목표 법선에 정렬한다. 또한 스케일 보정을 통해 경사 변형으로 인한 접평면 방향의 길이 변화를 보상한다. 이 과정에서 색상, 구면 조화 계수 및 불투명도는 유지하여 기존 장면의 시각적 외형을 가능한 한 보존한다.

편집 방법의 적용 가능성과 보정 요소별 영향을 확인하기 위해 LEGO, Hotdog 및 Ship 장면을 대상으로 실험을 수행하였다. 먼저 30° 조건에서 위치 보정만 적용한 P, 위치와 회전을 보정한 P+R, 위치·회전·스케일을 모두 보정한 P+R+S 조건을 비교하였다. 또한 장면별 지지 평면, 편집 ROI, 객체 보호 영역 및 ramp 구간을 고정한 상태에서 10°, 20°, 30°, 40°의 경사각을 적용하여 서로 다른 장면과 경사각에서 변환의 안정성을 확인하였다. 평가 항목에는 목표 ramp 대비 높이 오차, 회전 변환 일치 오차, 실제 출력 중심과 이상적 smoothstep 중심의 전역 적합 평면 법선 차이, 투영된 Edit ROI 경계의 alpha 불연속도, 실행시간, 메모리 사용량, scale 상한 도달률 및 NaN 발생 여부를 포함하였다. Garden 장면에서는 ROI coverage proxy RMSE, 3차원 경계 변위 불연속도 및 객체 보호 영역 침범 수를 이용하여 ROI 확장의 영향을 분석하였다. Garden 장면에서는 기존 ROI와 주변 Gaussian을 포함한 확장 ROI를 비교하여 편집 범위의 증가가 경계 불연속과 객체 보호 영역 침범에 미치는 영향을 분석하였다.

한편 본 연구는 성공 사례뿐 아니라 편집이 실패하는 조건도 함께 분석한다. Hotdog와 Ship 장면에서 지지면 전체를 변형한 경우에는 객체의 일부 Gaussian만 지지면과 함께 이동하면서 접촉부가 분리되거나 객체가 중복되어 보이는 현상이 나타났다. 또한 흙, 식생, 잎, 구조물 및 시야 경계가 혼재하는 Garden 장면에서는 낮고 평평한 Gaussian이 반드시 의미론적인 지면을 나타내지 않아, 기하학적 조건만으로 선택된 영역이 실제 편집 대상과 불일치하였다. 이러한 결과는 Gaussian 변환식의 수치적 안정성뿐 아니라, 편집 영역 선택과 객체 보호가 3DGS 지지면 편집의 성패를 결정하는 중요한 조건임을 보여준다.

본 연구의 주요 기여는 다음과 같다. 첫째, 학습된 3DGS 장면을 재학습하거나 메시로 변환하지 않고, 선택된 지지면 Gaussian의 위치·회전·스케일을 직접 수정하여 경사 지형을 생성하는 편집 절차를 제시하였다. 둘째, LEGO, Hotdog 및 Ship 장면에서 위치·회전·스케일 보정 요소를 분리하여 비교하고, 10°부터 40°까지의 네 경사각을 적용하여 기하 정렬, 실행 시간, 메모리 사용량 및 수치적 안정성을 평가하였다. 셋째, Garden 장면에서 단계적으로 ROI를 확장하여 편집 범위와 품질 사이의 관계를 분석하고, 단순한 ROI 확대만으로는 객체 침범과 경계 불연속 문제를 일관되게 해결할 수 없음을 확인하였다. 이를 통해 재학습 없는 직접 Gaussian 편집의 적용 가능성과 함께, 복잡한 장면에서 해결해야 할 지지면 선택 및 고경사 처리의 한계를 제시하였다.

Ⅱ. 관련 연구

2-1 3D Gaussian Splatting 장면 표현

3D Gaussian Splatting(3DGS)은 장면을 위치, 회전, 스케일, 불투명도 및 구면 조화 계수 기반 색상 정보를 갖는 비등방성 Gaussian의 집합으로 표현한다[1]. 각 Gaussian은 3차원 공간에서 타원체 형태의 분포를 가지며, 카메라 시점에 따라 화면 공간으로 투영된 후 alpha compositing을 통해 최종 영상을 생성한다. 이러한 명시적 원시요소 기반 표현은 높은 시각적 품질과 빠른 렌더링 성능을 제공한다.

그러나 3DGS는 삼각형 메시와 달리 정점, 면, 경계 및 위상 구조를 명시적으로 제공하지 않는다. 또한 일반적인 Gaussian에는 바닥, 객체 및 배경을 구분하는 의미론적 레이블이 포함되어 있지 않다. 따라서 특정 표면이나 객체를 편집하려면 Gaussian의 위치, 높이, 방향 및 색상 정보나 외부 분할 결과를 이용해 편집 대상을 별도로 추정해야 한다. 이러한

표현적 특성은 지지면 Gaussian을 선택하고 구조적으로 변형하는 작업을 어렵게 만드는 요인이다.

2-2 Stoch3DGS와 3DGRT

기존 3DGS는 Gaussian을 화면 공간으로 투영하는 rasterization 방식으로 렌더링한다[1]. 반면 3DGRT는 광선과 Gaussian 원시요소 간의 교차 및 누적 과정을 GPU 기반 ray tracing으로 처리한다[2]. 이를 통해 기존 splatting 방식과 다른 관점에서 Gaussian 장면을 렌더링하고 광선 기반 기하 정보를 분석할 수 있다.

Stoch3DGS는 ray-traced 3DGS에 확률적 샘플링을 적용하여 교차 Gaussian의 정렬 부담을 줄이는 미분 가능한 렌더링 방법이다[3]. 본 연구에서는 Stoch3DGS와 3DGRT 환경에서 학습 checkpoint를 불러오고 색상, 광선 방향 거리, 불투명도 및 법선 정보를 확인하여 장면 구조와 편집 후보 영역을 진단하였다.

다만 본 연구의 목적은 확률적 렌더링 방법을 개선하는 것이 아니라, 학습이 완료된 Gaussian의 위치, 회전 및 스케일을 직접 수정하는 것이다. 따라서 장면 진단에는 특정 렌더링 환경을 활용하지만, 최종 기하 편집 연산은 위치·회전·스케일 속성을 포함하는 일반적인 3DGS PLY에도 적용할 수 있다

2-3 3DGS 장면 편집

3DGS의 명시적 표현을 활용한 편집 연구는 외형 변경, 객체 단위 편집 및 기하 변형 등으로 발전하고 있다. GaussianEditor는 텍스트 명령을 이용한 국소 장면 편집을 수행하며[4], Gaussian Grouping은 Gaussian에 객체 단위 identity 정보를 부여하여 객체 분할과 편집을 지원한다[5]. Deformable 3D Gaussians와 PhysGaussian은 Gaussian의 위치, 회전 및 covariance를 변경하여 동적·물리적 변형을 표현한다[6],[7]. 한편 SuGaR는 Gaussian을 장면 표면에 정렬하고 메시를 추출하여 편집 가능한 표현을 구성하며[9], Gaussian Frosting은 메시 주변의 Gaussian 계층을 통해 변형과 애니메이션을 지원한다[10]. SAGA는 시각적 prompt를 기반으로 대상 Gaussian을 분할하여 의미론적 편집 영역을 구성한다[11].

이러한 방법들은 의미론적으로 구분된 객체를 편집하거나 Gaussian을 메시와 결합하여 변형하는 데 초점을 둔다. 반면 본 연구는 별도의 메시 변환이나 재학습 없이 노출 지지면 Gaussian의 위치·회전·스케일을 직접 수정하여 평면 지지면을 경사면으로 변형한다.

Ⅲ. 방법론

3-1 전체 파이프라인

본 연구에서는 학습된 3D Gaussian Splatting 장면에서 지지면에 해당하는 Gaussian을 선택하고, 해당 Gaussian의 위치, 회전 및 스케일 파라미터를 직접 수정하여 경사 지형을 생성한다. 각 Gaussian은 중심 위치 p_i, 회전 quaternion q_i, 축별 스케일 s_i, 불투명도 및 색상 계수로 구성된다. 본 연구에서는 재학습 없이 위치, 회전 및 스케일만 수정하며, 불투명도와 색상 계수는 원래 값을 유지한다.

제안 파이프라인은 네 단계로 구성된다. 첫째, 학습된 체크포인트 또는 Gaussian PLY에서 위치, 회전 및 스케일을 불러온다. 둘째, Gaussian 중심 위치 분포로부터 지지면 평면을 추정하고, 물체가 존재하는 영역을 제외하여 최종 지면 ROI를 구성한다. 셋째, 선택된 ROI에 경사 높이 함수 H(u)를 정의하고 각 위치에서의 목표 높이와 목표 법선을 계산한다. 넷째, Gaussian 중심을 경사면 위로 이동시키고, 경사면의 방향과 표면 길이 변화에 맞게 회전 및 스케일을 보정한다.

LEGO 실험에서는 체크포인트 로딩, 지지면 추정, ROI 선택, Gaussian 변환, PLY 출력 및 렌더링 평가를 순차적으로 수행하였다. 실제 Gaussian 변환은 선택된 Gaussian의 위치·회전·스케일만 복사하여 수정하는 방식으로 구현하였다.

본 방법은 특정 렌더러의 학습 및 렌더링 과정을 수정하지 않고 Gaussian의 기하 파라미터를 직접 변경하므로, 위치·회전·스케일 속성을 포함하는 일반적인 3DGS PLY에도 동일한 방식으로 적용할 수 있다.

3-2 지지면 평면 추정 및 편집 영역 선택

지지면 추정은 렌더링 영상이 아니라 전체 Gaussian의 중심 위치를 대상으로 수행한다. 월드 좌표계의 특정 축을 지면 방향으로 고정하지 않기 위해 Gaussian 중심점에 주성분 분석(PCA)을 적용하고, 각 주성분 축의 양·음 방향에서 낮은 위치에 분포한 Gaussian을 지지면 후보로 구성한다. 각 후보점 집합에 RANSAC 기반 평면 추정을 수행한 뒤[8], 선택된 inlier를 대상으로 특이값 분해(SVD)를 적용하여 최종 평면을 보정한다. 여러 후보 평면 중에서는 inlier 수, 평면상 분포 면적 및 잔차를 함께 고려하여 대표 지지면을 선택한다.

추정된 지지면은 평면 위의 기준점 p_0, 단위 법선 벡터 n, 그리고 서로 직교하는 두 접평면 축 t_u와 t_v로 표현한다. 각 Gaussian 중심 p_i를 지지면 기준 좌표계로 변환하면 다음과 같다.

$$u_i = (p_i - p_0)\cdot t_u \quad (1)$$
$$v_i = (p_i - p_0)\cdot t_v \quad (2)$$
$$h_i = (p_i - p_0)\cdot n \quad (3)$$

여기서 u_i는 경사면이 진행되는 방향의 위치, v_i는 경사 진행 방향과 수직인 측면 위치이다. h_i는 Gaussian 중심과 기준 평면 사이의 높이를 나타낸다. 이러한 좌표 변환을 통해 월드 좌표계의 Gaussian 위치를 지지면을 기준으로 한 지역 좌표계에서 처리할 수 있다.

Gaussian과 추정 평면 사이의 거리 $|h_i|$가 임계값 τ_p 이하이면 해당 Gaussian을 평면 inlier로 분류한다. 그러나 평면 inlier에는 실제 지면뿐만 아니라 물체의 하단부, 바닥과 접촉한 구조물 및 지면 주변의 노이즈 Gaussian도 포함될 수 있다.

이를 방지하기 위해 기준 평면보다 상대적으로 높은 Gaussian을 객체 후보로 선택하고, 해당 Gaussian을 (u, v) 평면에 투영하여 객체가 차지하는 영역을 구성한다. 이후 경계 누락을 방지하기 위해 객체 영역을 일정 비율 확장하고, 이를 지면 후보에서 제외한다. 마지막으로 경사면의 진행 방향과 시작·종료 범위를 적용하여 최종 편집 마스크를 구성한다.

$$M_{ground} = M_{plane} \cap \neg M_{object} \cap M_{ROI} \tag{4}$$

여기서 M_{plane}은 평면에 가까운 Gaussian, M_{object}는 객체 보호 영역, M_{ROI}는 경사면을 생성할 공간 범위를 의미한다. 따라서 최종 편집 대상은 평면에 가깝고, 객체 영역이 아니며, 지정된 경사 범위 안에 존재하는 Gaussian이다.

식 (4)에서 평면 마스크는 추정된 지지 평면에 가까운 Gaussian을 나타내고, 객체 보호 마스크는 편집에서 제외할 객체 및 접촉 영역을 나타낸다. 경사 범위 마스크는 사용자가 지정한 경사면의 공간적 범위를 의미한다. 따라서 최종 편집 ROI는 지지 평면에 가깝고, 객체 보호 영역에 포함되지 않으며, 지정된 경사 범위 안에 존재하는 Gaussian으로 구성된다.

여기서 편집 ROI는 장면 전체의 의미론적 지면을 분할한 결과가 아니라, 목표 경사 편집에 필요한 조건을 만족하는 작업 영역이다. 따라서 이후의 위치·회전·스케일 변환이 정확하더라도, 선택된 ROI가 실제 편집 대상과 일치하지 않으면 자연스러운 결과를 얻기 어렵다.

3-3 경사 높이 및 목표 법선 계산

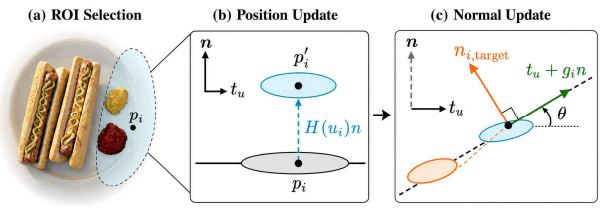


그림 1. 경사면 생성을 위한 Gaussian 위치 및 법선 보정 과정
Fig. 1. Gaussian position and normal correction for slope generation

LEGO 실험에서는 접평면 축 t_u 방향으로 높이가 변화하는 1차원 경사 함수 H(u)를 사용한다. 각 Gaussian의 u 좌표에 따라 해당 Gaussian을 얼마나 이동시킬 것인지 결정하며, 위치별 국소 기울기 g_i는 다음과 같이 계산한다.

$$g_i = dH(u_i)/d_u \tag{5}$$

본 연구의 ramp 높이는 시작점과 종료점 사이 전체 구간에 cubic smoothstep을 적용하므로 별도의 유한 선형 경사 구간을 두지 않는다. 따라서 목표 경사각은 ramp 양 끝점 사이의 평균 경사를 나타내며, 위치별 국소 기울기는 smoothstep에 따라 달라진다.

선택된 Gaussian 중심은 계산된 높이 $H(u_i)$만큼 지지면 법선 방향으로 이동한다.

$$p'_i = p_i + H(u_i)n \tag{6}$$

여기서 $H(u_i)$는 목표 절대 고도가 아니라 현재 Gaussian 중심에 추가되는 법선 방향 변위량이다. 따라서 원래 지지면이 월드 좌표계의 수평면과 정확히 일치하지 않더라도 추정된 지지면을 기준으로 일관된 변형을 적용할 수 있다.

위치만 수정하면 Gaussian 중심은 경사면 위에 배치되지만, Gaussian 타원체의 방향은 기존 지지면 방향을 유지한다. 이를 보정하기 위해 높이 함수의 국소 기울기로부터 목표 지형 법선을 계산한다.

$$n_i,target = (n - g_i t_u)/\|n - g_i t_u\| \tag{7}$$

평평한 구간에서는 g_i가 0이므로 목표 법선은 기존 지지면 법선 n과 같다. 경사 구간에서는 g_i에 따라 목표 법선이 경사면에 수직인 방향으로 회전한다.

3-4 Gaussian 회전 및 스케일 보정

Gaussian은 단순한 점이 아니라 회전과 축별 크기를 갖는 3차원 타원체이다. 따라서 중심 위치만 경사면으로 이동하면 Gaussian의 방향은 기존 지면에 대응한 상태로 남아 목표 경사면 법선과 불일치한다.

이를 해결하기 위해 기준 지지면 법선 n을 위치별 목표 법선 n_i,target으로 보내는 정렬 quaternion Q(n → n_i,target)을 계산한다. 계산된 정렬 quaternion을 기존 Gaussian 회전에 합성하여 최종 회전을 산출한다.

$$q_i' = normalize(q_{align,i} \otimes q_i) \tag{8}$$

본 연구에서는 기존 Gaussian orientation으로 로컬 축을 월드 좌표계로 회전한 뒤, 기준 지지면 법선을 목표 법선으로 정렬하는 추가 회전을 적용한다. Quaternion은 [w,x,y,z] 순

서로 저장하며, 월드 좌표계에서 계산한 추가 정렬 회전 $q_{align,i}$을 기존 orientation q_i의 왼쪽에 곱한다. 회전 합성 후에는 단위 quaternion 조건을 유지하도록 정규화한다.

따라서 회전 변환 일치 오차는 편집된 표면에서 법선을 독립적으로 다시 추정한 오차가 아니라, 적용된 회전 변환이 목표 법선과 일치하는지를 확인하는 변환 일치도 지표이다. 편집된 Gaussian 중심 분포의 기하학적 정렬은 출력 Gaussian 중심에 적합한 평면과 목표 경사면 사이의 각도 차이인 출력 평면 오차를 통해 별도로 평가하였다.

또한 평면을 경사면으로 변형하면 경사 진행 방향의 실제 표면 길이가 증가한다. 위치만 이동시키면 Gaussian 중심 사이의 표면상 간격이 넓어져 빈 영역이나 밀도 불균일이 발생할 수 있다. 이를 완화하기 위해 위치별 스케일 보정 비율 r_i를 다음과 같이 계산한다.

$$r_i = \sqrt{(1 + g_i^2)} \tag{9}$$

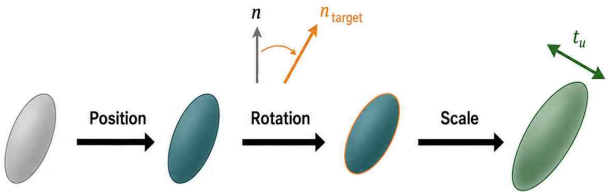


그림 2. Gaussian의 위치, 회전 및 접선 방향 스케일 보정 과정
Fig. 2. Position, rotation, and tangential-scale correction of a Gaussian

국소 기울기가 일정한 이상적 선형 경사면을 가정하면 $g_i = \tan\Theta$이므로 $r_i = 1/\cos\Theta$가 된다. 예를 들어 30도 경사면의 이론적 표면 길이 증가율은 약 1.1547이다.

회전 보정 후 Gaussian의 세 로컬 축을 월드 좌표계에서 계산하고, 그중 경사 진행 방향 t_u와 가장 잘 정렬된 축을 선택한다. 이후 선택된 축의 실제 스케일에 r_i를 적용하며 나머지 두 축은 유지한다.

3DGS 체크포인트의 스케일은 일반적으로 로그 영역에 저장되므로, 실제 스케일로 변환한 뒤 보정을 적용하고 다시 로그 영역으로 변환하여 저장한다. 실제 구현에서도 보정된 회전으로부터 로컬 축을 계산하고, t_u와의 내적 절댓값이 가장 큰 축에만 스케일 보정 비율을 적용한다.

위치, 회전 및 스케일 보정의 영향을 분리하기 위해 다음 세 조건을 비교한다.

- P: Gaussian 중심 위치만 보정
- P+R: 위치와 회전 보정
- P+R+S: 위치, 회전 및 경사 진행 방향의 스케일 보정

세 조건은 동일한 지면 ROI와 높이 함수를 사용한다. 따라서 회전 및 스케일 보정은 Gaussian 중심의 목표 높이를 변경하지 않으며, 회전 보정 효과는 회전 변환 일치 오차를 통해, 스케일 보정 효과는 최대 스케일 비율과 렌더링 결과를 통해 확인한다.

Ⅳ. 실험 및 결과

4-1 실험 설정 및 평가 지표

LEGO는 30,000 iteration Stoch3DGS checkpoint, Hotdog와 Ship은 7,000 iteration Gaussian PLY를 사용하였다. Garden은 3,643,005개 Gaussian의 pretrained PLY를 사용하였다. 다중 각도 실험에서는 장면별 지지 평면, edit ROI, 객체 보호 영역 및 ramp 구간을 고정하고 nominal angle만 10°, 20°, 30°, 40°로 변경하였다. 렌더링 기반 평가는 장면별로 고정한 4개 카메라 시점에서 수행하였다. 평가에는 view ID 0, 4, 12 및 20을 사용하였으며, P+R과 P+R+S 조건에는 동일한 카메라 extrinsic, intrinsic 및 800×800 해상도를 적용하였다. 카메라 위치와 영상 ID는 부가자료 표 7에 제시한다. 네 시점에서 측정된 값은 동일 가중치로 평균하고 표본 표준편차를 함께 보고하였다.

실험은 AMD Ryzen 9 9950X3D, RAM 32 GB, NVIDIA GeForce RTX 5090 32 GB 환경에서 수행하였다. 직접 편집은 NumPy 기반 CPU 경로만 사용하며 CUDA tensor를 생성하지 않는다. 주요 평가 항목은 회전 변환 일치 오차, 평면 적합 오차, 실행시간, 메모리 사용량, scale 상한 도달률

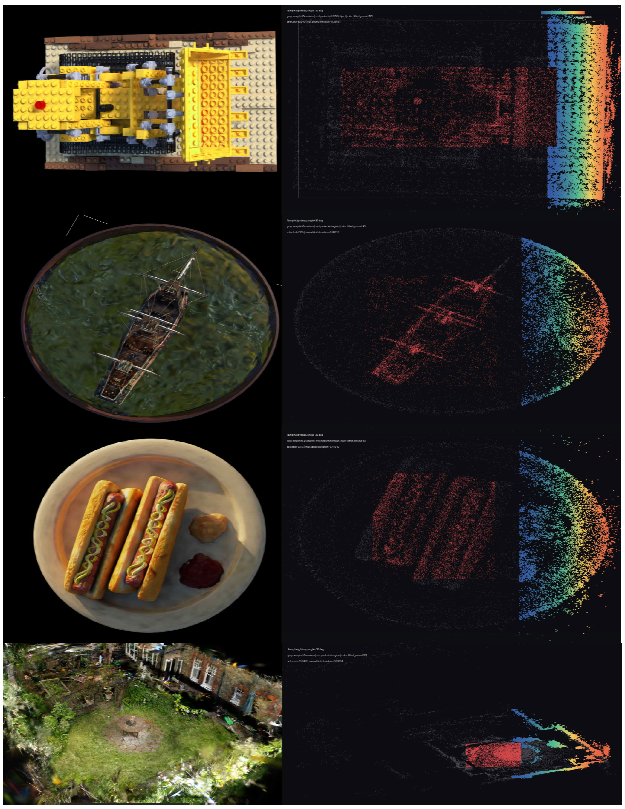


그림 3. 장면별 기준 렌더링 및 편집 Gaussian 선택 결과, 위에서부터 LEGO, Hotdog, Ship, Garden
Fig. 3. Reference renderings and selected Gaussians for editing by scene, from top to bottom: LEGO, Hotdog, Ship, and Garden

및 NaN 발생 여부이다. 회전 변환 일치 오차는 적용된 회전이 목표 법선 방향과 일치하는지를 나타내며, 독립적으로 추정한 표면 법선 정확도를 의미하지 않는다.

평면 적합 오차는 전체 Edit ROI의 실제 출력 Gaussian 중심과 이상적 smoothstep 중심에 각각 SVD 평면을 적합하고, 두 적합 평면 법선 사이의 각도 차이로 계산하였다. 계산은 월드 좌표에서 수행했으며 추가적인 이상치 제거는 적용하지 않았다. 전체 ROI에는 평탄부, smoothstep 구간 및 plateau가 포함되므로, 이 값은 국소 표면 법선이나 nominal 경사각의 오차가 아니라 두 중심 분포의 전역적인 방향 차이를 나타낸다.

렌더링 경계 불연속도는 P+R 조건의 Edit ROI Gaussian만 렌더링한 opacity가 0.02보다 큰 영역을 고정 경계 마스크로 설정하고, 해당 경계를 가로지르는 수평·수직 인접 픽셀의 최종 합성 alpha 차이 절댓값을 평균하여 계산하였다. 동일한 P+R 경계 마스크를 P+R과 P+R+S 조건에 공통으로 적용하였다. 화면 점유율은 전체 영상에서 RGB 최댓값이 0.01보다 큰 픽셀의 비율로, 빈 영역 비율은 foreground bounding box 내부의 background 픽셀 비율로 계산하였다. 장면별 결과는 네 개의 고정 시점에서 얻은 값의 평균과 표본 표준편차로 보고하였다. 장면별 지지 평면 추정과 편집 ROI 구성에 사용한 상세 파라미터는 부가자료의 표 4에 제시한다.

4-2 경사 지형 생성과 보정 요소의 효과

제안 방법은 선택된 지지면 Gaussian의 중심을 목표 높이로 이동시키고, Gaussian의 방향을 목표 법선에 맞게 회전시킨다. LEGO의 30° 조건에서는 총 62,340개의 Gaussian이 편집 ROI로 선택되었다. 표 1과 같이 위치만 변경한 P 조건의 회전 변환 일치 오차는 29.987047°였으며, 회전을 추가한 P+R 조건에서는 0.001382°로 감소하였다. 이는 적용된 회전이 목표 방향과 일치함을 확인한 결과이며, 편집 표면의 법선을 독립적으로 추정한 결과는 아니다.

표 1. LEGO 장면의 30° 경사 조건에서 보정 요소별 정량 평가 결과
Table 1. Quantitative comparison of Gaussian correction components in the LEGO scene at a 30° target slope

Condition	Edit ROI	Height RMSE	Rotation–Transform Consistency Error (°)	Max scale ratio
P	62,340	0.023866	29.987047°	1.0
P+R	62,340	0.023866	0.001382°	1.0
P+R+S	62,340	0.023866	0.001382°	1.3229

P+R+S 조건에서는 회전 변환 일치도를 유지하면서 경사 진행 방향의 최대 scale 비율이 1.3229로 증가하였다. 네 개의 고정 시점에서 Edit ROI 투영 경계의 alpha 불연속도를 비교한 결과, P+R+S는 P+R보다 LEGO에서 17.73%, Hotdog에서 2.70%, Ship에서 25.13% 증가하였다. 화면 점유율과 빈 영역 비율은 두 조건 사이의 변화가 작았으며 일관된 개선을 보이지 않았다. 따라서 접선 방향 스케일 보정은 현재 설정에서 경계 연속성을 개선하지 못했으며, 장면과 경사각에 따라 선택적으로 적용해야 하는 요소로 해석하였다. 장면별 평균과 표준편차는 부가자료 표 6에 제시한다.

30° 출력 PLY를 원본과 비교한 결과, LEGO·Hotdog·Ship 모두 ROI 외부와 객체 보호 영역에서 이동한 Gaussian은 0개였다. Gaussian의 순서와 위치·회전·스케일을 제외한 52개 속성도 유지되었다. 이는 편집이 선택된 지지면에만 적용되고 객체 및 나머지 장면 정보는 보존되었음을 의미한다.

세 장면의 고정 시점에서 Original, P, P+R, P+R+S를 비교한 결과, 회전 보정에 따른 방향 변화는 확인되었으나 접선 방향 스케일 보정은 렌더링 품질을 일관되게 개선하지 못했다. 세 장면에서 수행한 보정 요소별 시각적 비교 결과는 부가자료의 그림 7-9에 제시한다.

4-3 계산 효율성과 장면·경사각별 결과

실행 시간은 최초 1회를 워밍업으로 제외하고 장면별 5회 반복 측정하였다. 측정 범위에는 PLY 로딩, 지지면 및 ROI 추정, Gaussian 변환과 PLY 저장을 모두 포함하였다. 표 2와 같이 end-to-end 시간은 Hotdog 204.72 ms, Ship 216.44 ms, LEGO 1,418.21 ms였으며, 실제 Gaussian 변환 연산은 3.33–29.29 ms였다. 세 장면 모두 추가 GPU 메모리를 사용하지 않았다.

표 2. 장면별 편집 효율성 및 다중 경사각 안정성 평가 결과
Table 2. Scene-wise evaluation of editing efficiency and stability across multiple slope angles

Scene	Total time (ms)	Peak CPU memory (MB)	Transform-only time (ms)
LEGO	1418.21± 75.90	369.82	29.29 ± 0.18
Hotdog	204.72 ± 1.59	78.49	3.92 ± 0.07
Ship	216.44 ± 3.86	81.24	3.33 ± 0.22
Scene	**Fitted plane error range (°)**	**Scale clipping ratio at 40° (%)**	**NaN count**
LEGO	0.5767–1.8140°	33.49%	0
Hotdog	0.9726–1.4954°	38.19%	0
Ship	1.3441–3.4123°	34.04%	0

LEGO, Hotdog 및 Ship 장면에 10°, 20°, 30°, 40°의 경사를 적용한 총 12개 조건에서 NaN은 발생하지 않았으며, 회전 변환 일치 오차는 모두 0.0051° 이하로 나타났다. 실제 출력 중심과 이상적 smoothstep 중심 사이의 평면 적합 오차는 0.5767°–3.4123° 범위였다. 이 오차는 세 장면에서 경사각이 증가할수록 감소했지만, 이는 고경사 조건의 렌더링 품질이 향상되었음을 의미하지 않는다. 전체 smoothstep 중심 분포에 평면을 적합하는 특성상 동일한 중심 잔차의 상대적 영향이 고경사에서 작아질 수 있으며, 실제로 40° 조건에서는 평면 적합 오차가 감소한 반면 scale 상한 도달률과 경계 artifact는 증가하였다. 장면 및 경사각별 12개 조건의 전

체 정량 결과는 부가자료 A의 표 5에 제시한다.

세 장면의 Plane Inlier Ratio는 42.17–44.58% 범위로 나타났다. 최종 Edit ROI Ratio는 LEGO 10.53%, Hotdog 15.02%, Ship 10.99%였다. 회전 변환 일치 오차는 LEGO 0.001382°, Hotdog 0.004004°, Ship 0.002628°로 측정되었으며, 세 장면의 NaN Count는 모두 0이었다.



그림 4. 장면별 경사 지지면 편집 결과
Fig. 4. Sloped support surface editing results for each scene

상단은 세 장면의 30° 노출 지지면 편집 결과이며, 하단은 기준 렌더링과 Gaussian 선택 결과를 함께 나타낸다. ROI 시각화에서는 객체 보호 영역과 최종 편집 ROI를 구분하고, 편집 ROI 내부의 ramp 높이 분포를 색상으로 표시하였다.

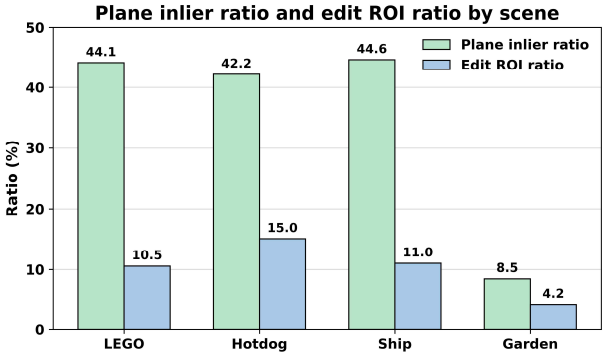


그림 5. 장면별 평면 인라이어 및 편집 ROI 비율
Fig. 5. Plane inlier and edit ROI ratios for each scene

4-4 고경사와 복잡 장면에서의 한계

수치적으로 안정적인 변환이 항상 자연스러운 렌더링을 의미하지는 않았다. Smoothstep ramp에서 30° nominal angle의 최대 국소 경사는 40.89°이고, 40°에서는 51.53°에 도달한다. 40° 조건에서는 장면별로 편집 Gaussian의 33.49–38.19%가 scale 상한에 도달했으며, 렌더링에서도 경계 늘어짐과 찢김이 증가하였다. 따라서 현재 설정의 시각적 적용 범위를 40°까지 일반화하기는 어렵다.

Garden에서는 식생과 불규칙한 지면으로 인해 지지면 ROI를 안정적으로 선택하기 어려웠다. 전체 Gaussian 중 평면 후보는 8.48%, 최종 Edit ROI는 4.18%였으며, 이 비율은 정확도가 아니라 선택된 범위의 크기를 의미한다. 1-hop 확장은 월드 좌표에서 구축한 12-nearest-neighbor 그래프의 직접 이웃을 추가하고, 2-hop 확장은 동일한 과정을 한 번 더 반복하였다. 제한적 확장은 평면 높이, 25° 이하의 법선 차이, ramp 범위, 연결성 및 객체 보호 조건을 모두 만족하는 Gaussian만 추가하였다. 높이 proxy RMSE는 고정된 low-height 후보 집합에서 각 ROI가 목표 ramp 높이를 포함하지 못한 정도를 나타내며, semantic ground-truth 기반 지면 정확도를 의미하지 않는다. 3차원 경계 변위 불연속도는 선택된 Gaussian과 선택되지 않은 12-NN 이웃 사이의 변위 차이를 평균한 값이다.

표 3. Garden 장면의 ROI 확장 조건별 편집 결과
Table 3. Editing results under different ROI expansion conditions in the Garden scene

Condition	ROI increase	ROI count	3D boundary discontinuity
G0 Baseline ROI	Baseline	152,408	3.8708
G1 1-hop	+6.1%	161,662	3.9752
G2 2-hop	+13.7%	173,320	3.8152
G3 Limited Expansion	+2.7%	156,524	4.1545
Condition	**Height proxy RMSE**	**Protected-region intrusions**	**Boundary change from G0**
G0 Baseline ROI	2.4000	0	Baseline
G1 1-hop	2.3921	78	+2.7% (Worse)
G2 2-hop	2.3813	247	−1.4% (Improved)
G3 Limited Expansion	2.3858	0	+7.3% (Worse)

ROI를 6.1–13.7% 확대했을 때 높이 오차의 최대 감소는 0.8%에 그쳤다. 경계 불연속은 2-hop에서만 1.4% 감소했으며, 1-hop과 제한적 확장에서는 오히려 증가하였다. 또한 1-hop과 2-hop은 객체 보호 영역을 각각 78개와 247개 침범하였다. 따라서 Garden의 낮은 ROI 비율을 품질 저하량으로 직접 환산할 수 없으며, 단순한 범위 확대만으로도 품질이 일관되게 개선되지 않았다. 이 결과는 복잡한 장면에서는 ROI의 크기보다 올바른 지지면 Gaussian을 선택하는 것이 중요함을 보여준다.

V. 고 찰

5-1 재학습 없는 직접 기하 편집의 의미

본 연구는 학습된 3DGS를 다시 최적화하거나 메시로 변환하지 않고, 선택된 지지면 Gaussian의 위치·회전·스케일을 직접 수정하여 경사 지형을 생성하였다. 최적화 반복은 0회이며, 전체 편집은 0.20–1.42초 안에 완료되었다. 추가 GPU 메모리를 요구하지 않았고 ROI 외부와 객체 보호 영역도 유지되었다. 따라서 본 연구에서 확인한 장점은 낮은 절대 계산 비용과 국소 편집의 보존성이다.

다만 본 연구에서는 동일한 입력과 목표 경사 형상을 사용

하는 재학습 기반 지형 편집 방법을 확보하지 못했으므로, 다른 방법보다 빠르다는 상대 비교는 수행하지 않았다. 실행 시간과 메모리 결과는 제안 방법의 절대적인 계산 비용으로만 해석한다.

5-2 보정 요소의 역할과 적용 범위

위치 보정은 Gaussian 중심을 목표 높이로 이동시키고, 회전 보정은 기준 지지면 법선에 적용된 회전을 목표 법선 방향과 일치시킨다. LEGO의 30° 조건에서 회전 변환 일치 오차는 29.9870°에서 0.001382°로 감소하였다. 이는 회전 변환이 의도한 방향으로 구현되었음을 확인하지만, 편집 표면에서 법선을 독립적으로 추정한 정확도 검증은 아니다. 접선 방향 스케일 보정은 회전 변환 일치도를 추가로 개선하지 않았으며, 세 장면 모두에서 Edit ROI 투영 경계의 alpha 불연속도를 증가시켰다. 따라서 위치와 회전은 경사 편집의 핵심 요소이며, 스케일 보정은 경계 artifact와 scale clipping을 고려하여 선택적으로 적용해야 한다.

10° 조건에서는 세 장면 모두 비교적 안정적인 결과를 보였지만 경사가 커질수록 경계 변형이 증가하였다. 특히 40°에서는 scale clipping과 경계 artifact가 함께 나타났다. 향후 고경사 편집에는 고정 scale 상한을 적용하는 방식보다 Gaussian 밀도 재배치, 경계 전이 폭 조정 또는 제한적인 appearance 보정이 필요하다.

5-3 ROI 선택의 한계와 향후 방향

최종 edit ROI는 의미론적 지면 전체가 아니라 편집 목적, 객체 접촉부 및 ramp 범위에 따라 정해지는 작업 영역이다. 따라서 하나의 정답 ROI를 정의하기 어렵고, Plane Inlier Ratio와 Edit ROI Ratio도 정확도가 아닌 선택 규모로 해석하였다. 의미론적 지면 분리 정확도를 별도로 검증하지 못한 점은 본 연구의 한계다.

향후 자동 ROI는 네 단계로 구성할 수 있다. 먼저 평면 거리와 Gaussian 방향으로 지지면 후보를 찾고, semantic·depth·multi-view 정보로 지면 가능성을 보완한다. 다음으로 객체와 접촉 영역을 제외하고 연결된 지지면만 제한적으로 확장한다. 마지막으로 객체 침범, 경계 불연속 및 scale 상한 도달률을 검사하여 기준을 넘으면 편집을 중단하거나 사용자 확인을 요청한다. 이는 Garden 실패 분석에서 도출한 향후 연구 방향이며, 본 연구에서 구현한 결과로 주장하지 않는다.

그림 6은 Garden 장면에서 기하 조건에 의해 과도하게 선택된 원거리 Gaussian을 제거하기 전과 후의 결과를 보여준다.

(a) Modified PLY model (b) Existing PLY model



그림 6. Garden 장면에서 원거리 Gaussian 제거 전(왼쪽)과 후(오른쪽)의 비교

Fig. 6. Comparison of the Garden scene before (left) and after (right) removing distant Gaussians

Ⅵ. 결 론

본 연구에서는 학습된 3D Gaussian Splatting 장면을 재학습하거나 메시로 변환하지 않고, 선택된 지지면 Gaussian의 위치·회전·스케일을 직접 수정하여 경사 지형을 생성하는 방법을 검증하였다. 위치 보정은 Gaussian 중심을 목표 높이로 이동시키고, 회전 보정은 Gaussian의 방향을 목표 경사면 법선에 정렬한다. 접선 방향 스케일 보정은 경사 변형에 따른 국소적인 splat 크기 변화를 보완하기 위해 적용하였다.

LEGO의 30° 조건에서 위치 보정만 적용했을 때의 회전 변환 일치 오차는 29.987047°였으나, 회전 보정을 추가하면 0.001382°로 감소하였다. 이 결과는 적용된 회전이 목표 방향과 일치함을 확인한 것으로, 편집 표면의 법선을 독립적으로 추정한 결과는 아니다. LEGO, Hotdog 및 Ship에 10°, 20°, 30°, 40°를 적용한 12개 조건에서는 NaN이 발생하지 않았고, 실제 출력 중심과 이상적 smoothstep 중심 사이의 평면 적합 오차는 0.5767°–3.4123°였다. 전체 편집 시간은 0.20–1.42초였으며 추가 GPU 메모리를 사용하지 않았다. 네 개의 고정 시점에서 측정한 Edit ROI 경계의 alpha 불연속도는 P+R+S 조건에서 P+R보다 LEGO 17.73%, Hotdog 2.70%, Ship 25.13% 증가하였다. 따라서 접선 방향 스케일 보정은 현재 설정에서 경계 연속성을 개선하지 못했다.

그러나 수치적으로 안정적인 변환이 항상 자연스러운 렌더링 결과를 보장하지는 않았다. 40° 조건에서는 최대 국소 경사가 51.53°에 도달하면서 장면별로 33.49%–38.19%의 Gaussian이 scale 상한에 도달하였고, 경계 늘어짐과 찢김이 증가하였다. Garden에서는 ROI 확장에 따른 높이 proxy RMSE의 최대 감소가 0.78%에 그쳤으며, 3차원 경계 변위 불연속도도 일관되게 감소하지 않았다. 또한 1-hop과 2-hop 확장은 객체 보호 영역을 각각 78개와 247개 침범하였다. 따라서 복잡한 장면에서는 ROI의 크기보다 적절한 지지면 Gaussian을 선택하고 객체 접촉 영역을 보호하는 것이 중요하다.

이상의 결과는 제안한 Gaussian 변환식이 명확한 지지면을 가진 장면에서 재학습 없이 낮은 절대 계산 비용으로 수치적으로 안정적으로 적용될 수 있음을 보여준다. 동시에 최종 편집 품질은 의미적으로 적절한 지지면 ROI, 객체 접촉 영역의 보호, 경계의 연속성 및 고경사에서의 스케일 처리에 의해 결정된다. 향후에는 평면 거리와 Gaussian 방향뿐 아니라 semantic, depth 및 multi-view 정보를 결합하여 지지면 후보를 보완하고, 객체 침범·경계 불연속·scale clipping을 사전에 검사하는 자동 ROI 결정 방법으로 확장할 필요가 있다.

부 록

표 4. 장면별 지지 평면 추정 및 편집 ROI 구성에 사용한 파라미터
Table 4. Scene-wise parameters used for support-plane estimation and editing ROI construction

Scene	RANSAC distance threshold, (τ_p)	RANSAC iterations	Object height threshold, h_{obj}	Protection margin	Ramp interval
LEGO	0.085518	700	0.550345	0%	[0.631671, 1.096396]
Hotdog	0.060000	700	0.250948	4%	[-0.158968, 0.551956]
Ship	0.120000	700	0.480000	6%	[0.688863, 1.397574]
Garden	0.574140	700	2.982830	0%	[3.111217, 16.761229]

Note: τ_p denotes the distance threshold for RANSAC plane estimation, while h_{obj} denotes the height threshold used to distinguish object candidates relative to the estimated support plane. The protection margin represents the additional expansion of the object protection region, and the ramp interval indicates the range over which the slope is applied in the local coordinate system of the support surface. All spatial parameters use the same scene-coordinate units as the Gaussian world coordinates. "Automatic" indicates values automatically determined based on the spatial distribution of the scene.

표 5. LEGO, Hotdog 및 Ship 장면에 10°, 20°, 30°, 40°의 목표 경사각을 적용한 정량적 편집 결과
Table 5. Quantitative results for LEGO, Hotdog, and Ship at target slope angles of 10°, 20°, 30°, and 40°.

Scene	Slope angle (°)	Rotation–Transform Consistency Error (°)	Fitted plane error (°)	Scale clipping ratio (%)	NaN count
LEGO	10°	0.0023°	1.8140°	0.00%	0
LEGO	20°	0.0017°	1.2840°	0.00%	0
LEGO	30°	0.0014°	0.8601°	0.00%	0
LEGO	40°	0.0013°	0.5767°	33.49%	0
Hotdog	10°	0.0051°	1.4954°	0.00%	0
Hotdog	20°	0.0046°	1.4463°	0.00%	0
Hotdog	30°	0.0040°	1.2547°	0.00%	0
Hotdog	40°	0.0038°	0.9726°	38.19%	0
Ship	10°	0.0032°	3.4123°	0.00%	0
Ship	20°	0.0029°	2.3198°	0.00%	0
Ship	30°	0.0026°	1.6844°	0.00%	0
Ship	40°	0.0023°	1.3441°	34.04%	0

Note: The rotation–transform consistency error represents the angular difference between the orientation of the edited Gaussians and the normal of the target sloped plane. The fitted plane error indicates the angular difference between the plane fitted to the centers of the edited Gaussians and the target sloped plane. The scale clipping ratio represents the percentage of edited Gaussians that reach the predefined upper scale limit.

표 6. LEGO, Hotdog 및 Ship 장면에서 P+R과 P+R+S 조건의 렌더링 기반 평가 결과
Table 6. Rendering-based evaluation results for the P+R and P+R+S conditions in the LEGO, Hotdog, and Ship scenes

Scene	Condition	Boundary alpha discontinuity	Screen occupancy (%)	Hole ratio (%)
LEGO	P+R	0.0129 ± 0.0075	29.41 ± 6.20	43.97 ± 5.27
LEGO	P+R+S	0.0152 ± 0.0094	29.44 ± 6.20	43.95 ± 5.25
Hotdog	P+R	0.0053 ± 0.0029	38.07 ± 2.18	25.84 ± 2.12
Hotdog	P+R+S	0.0055 ± 0.0032	38.03 ± 2.22	25.91 ± 2.20
Ship	P+R	0.0345 ± 0.0091	53.55 ± 0.87	22.76 ± 1.99
Ship	P+R+S	0.0432 ± 0.0107	53.59 ± 0.87	22.78 ± 1.91

Note: All values are reported as mean ± standard deviation measured from four fixed viewpoints.

표 7. 정량적 렌더링 평가에 사용된 고정 시점의 카메라 위치
Table 7. Camera positions of the fixed views used for quantitative rendering evaluation

Scene	View	Position (x, y, z)
LEGO	0	(−0.682, 2.656, 2.955)
LEGO	4	(−2.405, 1.526, 2.853)
LEGO	12	(−0.865, −3.371, 2.035)
LEGO	20	(−0.995, 3.874, 0.506)
Hotdog	0	(0.000, 2.737, 2.959)
Hotdog	4	(−0.682, 2.656, 2.955)
Hotdog	12	(−1.915, 2.040, 2.902)
Hotdog	20	(−2.769, 0.900, 2.788)
Ship	0	(0.000, 2.737, 2.959)
Ship	4	(−0.682, 2.656, 2.955)
Ship	12	(−1.915, 2.040, 2.902)
Ship	20	(−2.769, 0.900, 2.788)

Note: The camera position was expressed in the scene's world coordinate system (x, y, z).

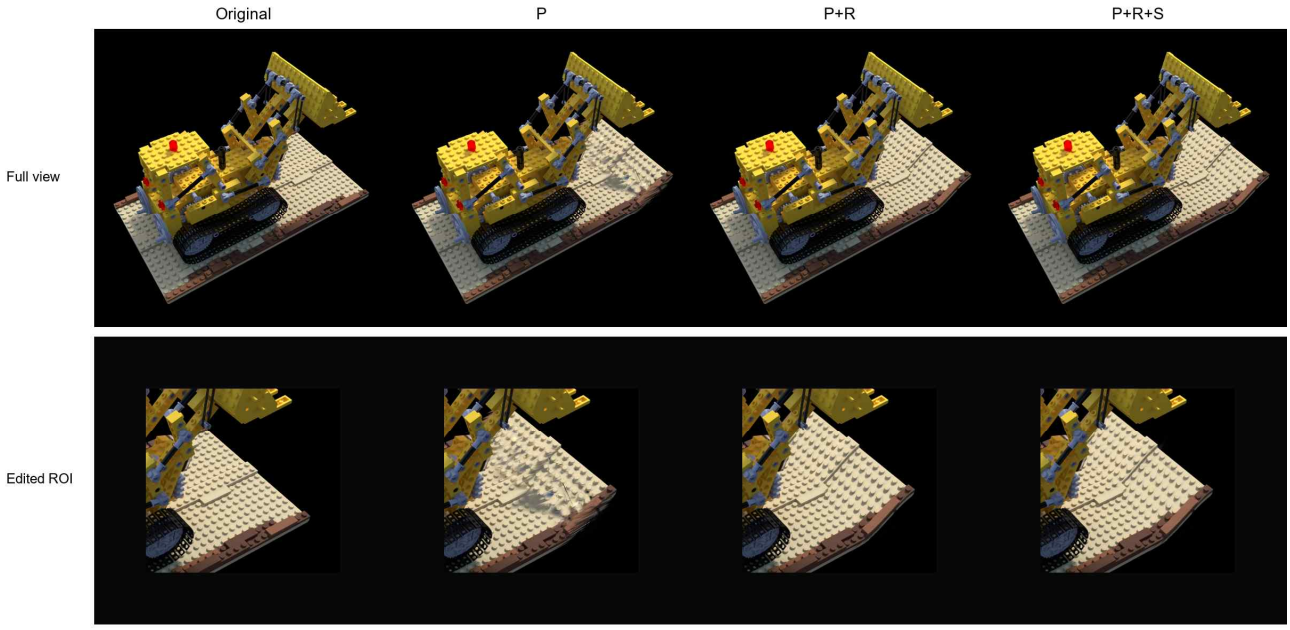


그림 7. LEGO 장면의 목표 경사각 30°에서 Gaussian 보정 요소별 시각적 비교. 열은 Original, P, P+R, P+R+S 조건을 나타내며, 위 행은 전체 장면, 아래 행은 편집 ROI를 확대한 결과이다. P, R, S는 각각 위치, 회전, 접선 방향 스케일 보정을 의미한다.

Fig. 7. Qualitative comparison of Gaussian correction components in the LEGO scene at a target slope angle of 30°. The columns show the Original, P, P+R, and P+R+S conditions, while the top and bottom rows show the full view and the edited ROI, respectively. P, R, and S denote position, rotation, and tangential-scale correction.

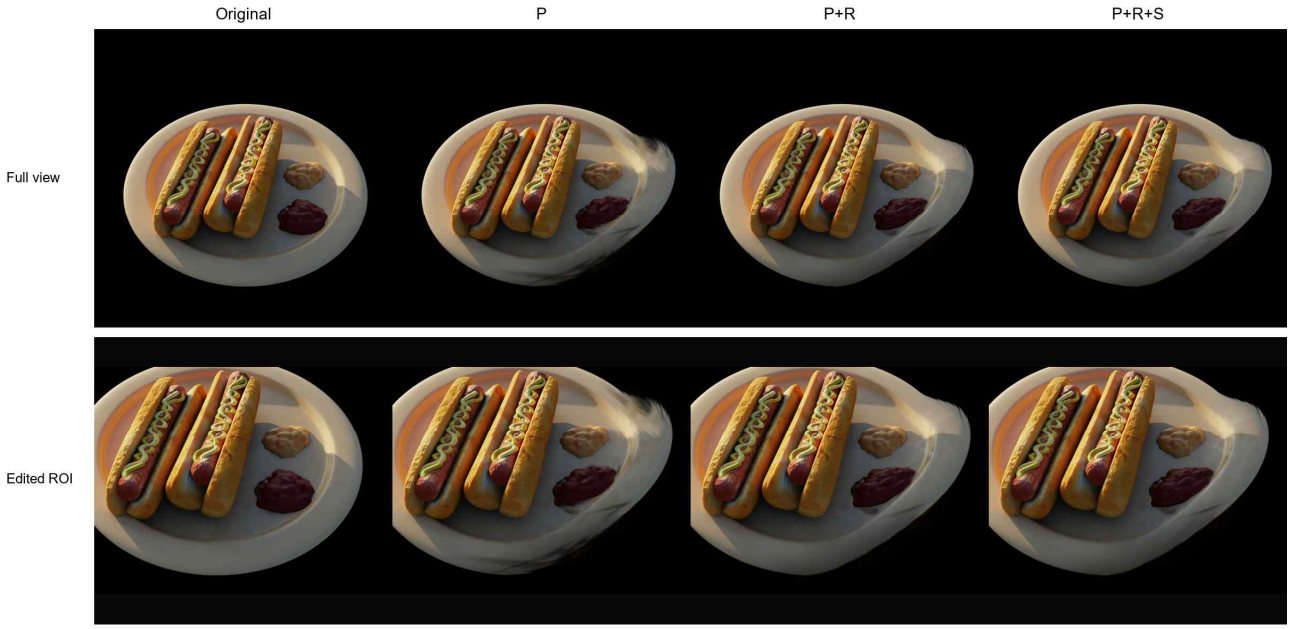


그림 8. Hotdog 장면의 목표 경사각 30°에서 Gaussian 보정 요소별 시각적 비교. 열은 Original, P, P+R, P+R+S 조건을 나타내며, 위 행은 전체 장면, 아래 행은 편집 ROI를 확대한 결과이다. P, R, S는 각각 위치, 회전, 접선 방향 스케일 보정을 의미한다.

Fig. 8. Qualitative comparison of Gaussian correction components in the Hotdog scene at a target slope angle of 30°. The columns show the Original, P, P+R, and P+R+S conditions, while the top and bottom rows show the full view and the edited ROI, respectively. P, R, and S denote position, rotation, and tangential-scale correction.

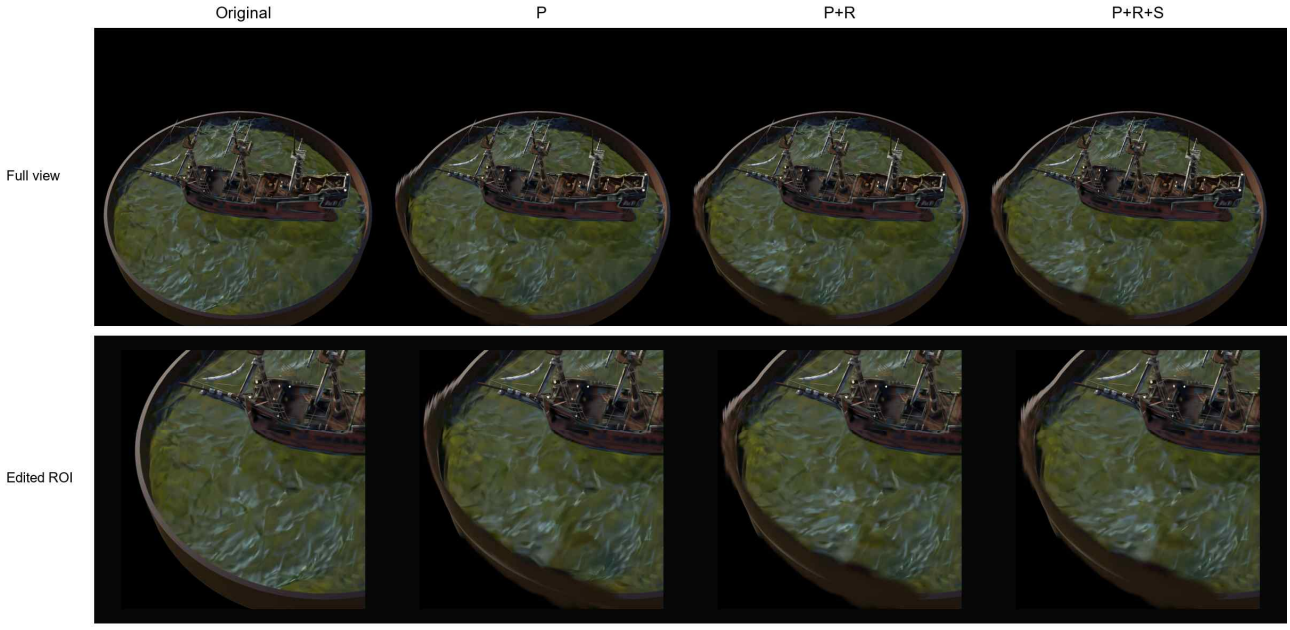


그림 9. Ship 장면의 목표 경사각 30°에서 Gaussian 보정 요소별 시각적 비교. 열은 Original, P, P+R, P+R+S 조건을 나타내며, 위 행은 전체 장면, 아래 행은 편집 ROI를 확대한 결과이다. P, R, S는 각각 위치, 회전, 접선 방향 스케일 보정을 의미한다.

Fig. 9. Qualitative comparison of Gaussian correction components in the Ship scene at a target slope angle of 30°. The columns show the Original, P, P+R, and P+R+S conditions, while the top and bottom rows show the full view and the edited ROI, respectively. P, R, and S denote position, rotation, and tangential-scale correction.

참고문헌

[1] B. Kerbl, G. Kopanas, T. Leimkühler, and G. Drettakis, “3D Gaussian Splatting for Real-Time Radiance Field Rendering,” *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 42, No. 4, 139, 2023.

[2] N. Moenne-Loccoz, A. Mirzaei, O. Perel, R. De Lutio, J. Martinez Esturo, G. State, and Z. Gojcic, “3D Gaussian Ray Tracing: Fast Tracing of Particle Scenes,” *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, Vol. 43, No. 6, 232, 2024.

[3] P. Xu, X. Sun, K. Mullia, R. Fei, I. Georgiev, and S. Zhao, “Stochastic Ray Tracing for the Reconstruction of 3D Gaussian Splatting,” arXiv:2603.23637, 2026. https://doi.org/10.48550/arXiv.2603.23637

[4] J. Wang, J. Fang, X. Zhang, L. Xie, and Q. Tian, “Gaussianeditor: Editing 3D Gaussians Delicately with Text Instructions,” in *Proceedings of the 2024 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR),* Seattle:WA, pp. 20902-20911, June 2024.

[5] M. Ye, M. Danelljan, F. Yu, and L. Ke, “Gaussian Grouping: Segment and Edit Anything in 3D Scenes, in *Proceedings of the 18th European Conference on Computer Vision*, Milan, Italy, pp. 162-179, September 2024.

[6] Z. Yang, X. Gao, W. Zhou, S. Jiao, Y. Zhang, and X. Jin, “Deformable 3D Gaussians for High-Fidelity Monocular Dynamic Scene Reconstruction,” in *Proceedings of the 2024 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, Seattle: WA, pp. 20331-20341, June 2024.

[7] T. Xie, Z. Zong, Y. Qiu, X. Li, Y. Feng, Y. Yang, and C. Jiang, “Physgaussian: Physics-Integrated 3D Gaussians for Generative Dynamics,” in *Proceedings of the 2024 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, Seattle: WA, pp. 4389-4398, June 2024.

[8] M. A. Fischler and R. C. Bolles, “Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography,” *Communications of the ACM*, Vol. 24, No. 6, pp. 381-395, 1981.

[9] A. Guédon and V. Lepetit, “Sugar: Surface-Aligned Gaussian Splatting for Efficient 3D Mesh Reconstruction and High-Quality Mesh Rendering,” in *Proceedings of the 2024 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, Seattle: WA, pp. 5354-5363, June 2024.

[10] A. Guédon and V. Lepetit, “Gaussian Frosting: Editable Complex Radiance Fields with Real-Time Rendering,” in *Proceedings of the 18th European Conference on Computer Vision*, Milan, Italy, pp. 413-430, September 2024.

[11] J. Cen, J. Fang, C. Yang, L. Xie, X. Zhang, W. Shen, and Q. Tian, “Segment Any 3D Gaussians,” in *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence,* pp. 1971-1979, April 2025.



이제민(Jemin Lee)

2025년 : 국립금오공과대학교 컴퓨터공학부 (학사)
2026년 : 국립금오공과대학교 소프트웨어공학과 (석사과정)

2020년～2025년: 국립금오공과대학교 컴퓨터공학부 학사
2025년～현 재: 국립금오공과대학교 소프트웨어공학과 석사과정

※관심분야 : AX(AI Transformation), 확장현실(Extended Reality), 인간컴퓨터상호작용(Human Computer Interaction) 등



김정현(Jeonghyeon Kim)

2025년 : 국립금오공과대학교 컴퓨터공학부 (학사)
2026년 : 국립금오공과대학교 소프트웨어공학과 (석사과정)

2020년～2025년: 국립금오공과대학교 컴퓨터공학부 학사
2025년～현 재: 국립금오공과대학교 소프트웨어공학과 석사과정

※관심분야 : AX(AI Transformation), 확장현실(Extended Reality), 인간컴퓨터상호작용(Human Computer Interaction) 등



강형준(Hyeongjun Kang)

2023년 : 국립금오공과대학교 컴퓨터공학부 재학중

2023년～현 재: 국립금오공과대학교 컴퓨터공학부 학사과정

※관심분야 : AX(AI Transformation), 확장현실(Extended Reality), 인간컴퓨터상호작용(Human Computer Interaction) 등



이동희(Donghee Lee)

2023년 : 국립금오공과대학교 컴퓨터공학부 재학중

2023년~현 재: 국립금오공과대학교 컴퓨터공학부 학사과정
※관심분야 : AX(AI Transformation), 확장현실(Extended Reality), 인간컴퓨터상호작용(Human Computer Interaction) 등



이주영(Juyoung Lee)

2023년 : 국립금오공과대학교 컴퓨터공학부 재학중

2023년~현 재: 국립금오공과대학교 컴퓨터공학부 학사과정
※관심분야 : AX(AI Transformation), 확장현실(Extended Reality), 인간컴퓨터상호작용(Human Computer Interaction) 등



김지형(Jihyung Kim)

2015년 : 국립한밭대학교(공학사)
2017년 : 국립한밭대학교(공학석사)
2022년 : 포항공과대학교(공학박사)

2022년~2024년: 포항공과대학교 미래IT융합연구원 박사 후 연구원
2024년~현 재: 국립금오공과대학교 컴퓨터공학부 조교수
※관심분야 : 몰입형 기술(Immersive Technology), 디지털 트윈(Digital Twin), 기술 기반 학습(Technology-enhanced Learning), 인간 컴퓨터 상호작용(Human-Computer Interaction)



류훈(Hoon Ryu)

2011년 : Purdue 대학교 전기컴퓨터공학부 (공학박사)
2005년 : Stanford 대학교 전기공학부 (공학석사)
2003년 : 서울대학교 전기공학부 (공학사)

2005년~2011년: 삼성전자 반도체총괄 System LSI 사업부
2011년~2024년: 한국과학기술정보연구원 국가슈퍼컴퓨팅본부 선임/책임연구원/양자정보응용연구단장
2024년~현 재: 국립금오공과대학교 컴퓨터공학부 교수
※관심분야 : 반도체 소재 전자구조 계산 (Electronic Structure Calculation for Semiconductor Materials), 거대 수치해석 병렬처리 (Parallel Processing of Numerical Analysis), 양자 알고리즘 활용기술 (Applications of Quantum Algorithm) 등



최동수(Dong-Soo Choi)

2013년 : 한국기술교육대학교(공학사)
2015년 : 한국기술교육대학교(공학석사)
2020년 : 한국기술교육대학교(공학박사)

2022년~2025년: 국립금오공과대학교 컴퓨터공학부 조교수
2025년~현 재: 국립금오공과대학교 컴퓨터공학부 부교수
※관심분야 : 몰입형 VR/AR, 햅틱(Haptics), 투명 압력 센서, 3D 터치 센서, 진동 촉각 액추에이터, 초점 가변 렌즈



김영원(Youngwon Kim)

2018년 : 고려대학교 대학원 (공학박사)
2012년 : 고려대학교 (공학사)

2018년~2019년: 고려대학교
2019년~2023년: 한국전자기술연구원(KETI)
2024년~현 재: 국립금오공과대학교 컴퓨터공학부 교수
※관심분야 : AX(AI Transformation), 확장현실(Extended Reality), 인간컴퓨터상호작용(Human Computer Interaction) 등