JDCS
디지털콘텐츠학회논문지
Journal of Digital Contents Society
Vol. 27, No. 10, pp. 2741-2751, Oct. 2026

Check for updates

야외 조형물의 3DGS 재현 품질을 위한 모바일 통합 촬영 전략: 사례 기반 분석

김 상 호[1] · 문 주 연[2] · 이 가 은[1] · 송 한 주[2] · 김 지 윤[3*]
[1]홍익대학교 영상·커뮤니케이션대학원 영상디자인전공 석사과정
[2]홍익대학교 영상·커뮤니케이션대학원 게임콘텐츠전공 석사과정
[3]홍익대학교 영상·커뮤니케이션대학원 부교수

Integrated Mobile Capture Strategy for 3D Gaussian Splatting Reconstruction Quality of Outdoor Sculptures: A Case-Based Analysis

Sang-Ho Kim[1] · Ju-Yeon Moon[2] · Ga-Eun Lee[1] · Han-Ju Song[2] · Jee-Youn Kim[3*]
[1]Master's Course, Department of Film Design, Graduate School of Film, Digital Media & Communication, Hongik University, Seoul 04066, Korea
[2]Master's Course, Department of Game Contents, Graduate School of Film, Digital Media & Communication, Hongik University, Seoul 04066, Korea
[3]Associate Professor, Department of Film Design, Graduate School of Film, Digital Media & Communication, Hongik University, Seoul 04066, Korea

[요 약]

본 연구는 야외 조형물의 3D Gaussian Splatting(3DGS) 재현 품질을 높이는 모바일 촬영 방법을 검토하였다. 일시적 객체, 조도 변화, 포즈 오차, 저텍스처 영역 등 야외 촬영의 한계에 대응하여, 원형 궤도 동선, 다층 높이, 거리 변화, 하늘 비중 축소, 고정 노출을 결합한 통합 촬영 전략을 구성하고 시흥 따오기노래비공원의 조형물 6종에 적용하였다. 여섯 객체 모두에서 PSNR, SSIM, LPIPS가 개선되었으며, 평균 PSNR은 4.44 dB 증가하였다. 다만 사전·사후 촬영 사이에는 촬영 전략 외에도 입력 방식과 촬영 환경의 차이가 있어, 이 개선을 전략의 효과만으로 단정하기보다는 이러한 조건 차이가 함께 작용한 경향으로 해석하였다. 전문가 5인의 평가에서도 전략 적용본이 더 높게 평가되었으나, 비교 조건과 평가자 구성이 완전히 통제되지는 않았다. 이러한 결과를 바탕으로 모바일 야외 3DGS 촬영 가이드라인을 제안한다.

[Abstract]

This study examined mobile capture methods for improving the outdoor sculpture reconstruction quality in three-dimensional Gaussian splatting (3DGS). An integrated capture strategy combining circular orbit paths, multiple heights, distance variation, reduced sky proportion, and fixed exposure was applied to six sculptures at Ttaogi Norebi Park, Siheung, Gyeonggi Province, South Korea, to address outdoor limitations, including transient objects, illumination variation, pose errors, and low-texture regions. All six objects exhibited improved peak signal-to-noise ratio (PSNR), structural similarity index, and learned perceptual image patch similarity, with the average PSNR increasing by 4.44 dB. However, the input format and shooting environment differed between pre- and post-capture; thus, the improvement is interpreted as an associated trend rather than a strategy-driven effect. Five experts rated strategy-applied reconstructions higher, although the conditions and evaluator compositions were not fully controlled. Based on these results, this study proposes a mobile outdoor 3DGS capture guideline.

색인어 : 3DGS, 가우시안 스플래팅, 디지털 재현, 모바일 촬영, 야외 조형물
Keyword : 3DGS, Gaussian Splatting, Digital Reconstruction, Mobile Capture, Outdoor Sculpture

http://dx.doi.org/10.9728/dcs.2026.27.10.2741

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 30 June 2026; **Revised** 27 July 2026
Accepted 04 September 2026

***Corresponding Author; Jee-Youn Kim**
Tel: +82-2-320-2228
E-mail: bunchung@hongik.ac.kr

Ⅰ. 서 론

야외 공공 공간에 설치된 캐릭터 조형물, 인물상, 환경 조형물 등은 상시 노출되는 특성상 노후화와 물리적 훼손이 반복되며, 운영 종료 등으로 원형이 손실되면 복원이 어렵다. 이러한 조건에서 야외 설치물을 디지털 형태로 재현하여 보존하고 재활용하려는 기술적 수요가 늘고 있다.

3DGS(3D Gaussian Splatting)[1]는 NeRF(Neural Radiance Fields)[2]의 한계를 보완하며 주목받고 있다. NeRF는 높은 사실성을 구현하나 긴 학습 시간과 고사양 연산을 요구하는 반면, 2023년 공개된 3DGS는 학습이 빠르고 실시간 렌더링이 가능하며, 모바일 기기로 촬영한 영상으로부터도 비교적 단순한 파이프라인으로 결과를 산출할 수 있어 디지털 재현의 진입 장벽을 낮추었다.

그러나 야외 환경에서 3DGS를 적용할 때는 통제된 실내와 다른 어려움이 발생한다. 유동 인구와 차량 등 일시적 객체, 식생의 흔들림, 시간대에 따른 조도 변화, 하늘과 바닥 같은 저텍스처 영역은 SfM(Structure from Motion) 단계의 카메라 포즈 추정과 3DGS 학습 모두에 부정적 영향을 미친다. 이러한 요인은 통제된 실내를 전제로 한 기존 촬영 지침을 야외에 그대로 적용하기 어렵게 한다.

이러한 어려움을 다룬 선행연구는 크게 두 갈래로 진행되어 왔다. 첫째는 SpotLessSplats[3], WildGaussians[4], SWAG[5]와 같이 알고리즘적 보완으로 일시적 객체와 외관 변화에 대응하는 연구이고, 둘째는 Rangelov 등[6], Liu 등[7]과 같이 카메라 설정, 촬영 거리, 시점 배치 등 촬영 변수가 결과 품질에 미치는 영향을 분석하는 연구이다. 그러나 후자의 연구들은 실내 스튜디오 또는 통제된 실험 조건을 대상으로 하였고, 일시적 객체와 조도 변화가 상존하는 실제 야외 설치 조형물에서 촬영 방법이 3DGS 재현 품질에 어떻게 연결되는지를 사례 기반으로 분석한 연구는 충분히 축적되어 있지 않다.

이에 본 연구는 선행연구가 보고한 촬영 요소들을 야외 환경에 대응하는 통합 촬영 전략으로 구성하고, 이를 실제 야외 조형물에 적용한 전후의 재현 품질 변화를 사례 기반으로 검토한다. 재현 품질은 정량 지표로, 재현 결과물의 표현성과 실무 활용 가능성은 전문가 정성 평가로 검토하며, 이를 통해 모바일 촬영 환경에서 적용 가능한 야외 3DGS 촬영 가이드라인을 도출하는 것을 목적으로 한다.

Ⅱ. 이론적 배경

2-1 3D Gaussian Splatting의 기술적 개요

3DGS는 3D 공간상의 점들을 비등방성 가우시안(anisotropic Gaussian)으로 표현하는 명시적 3D 표현 기법이다[1]. 각 가우시안은 위치·공분산(모양과 방향)·색상·투명도를 매개변수로 가지며, 비등방성 덕분에 적은 수의 점으로도 표면을 효율적으로 근사한다.

입력 영상에서 SfM을 구현한 오픈소스 소프트웨어인 COLMAP[12]으로 초기 포인트 클라우드를 추정한 뒤 각 점에 가우시안을 배치하고, 이를 화면에 투영해 합성한 결과를 원본과 비교하면서 미분 가능한 래스터화로 매개변수를 반복 최적화한다. 학습이 끝나면 임의의 시점에서 가우시안을 화면에 투영(splatting)하고 색을 합성해 실시간에 가까운 렌더링이 가능하다. 각 단계의 기법과 목적은 표 1과 같다. 묵시적 표현 방식인 NeRF[2]와 달리 3DGS는 명시적 표현을 채택해 학습과 렌더링 효율을 높였다.

표 1. 3D Gaussian Splatting의 기술적 개요
Table 1. Technical overview of 3D Gaussian splatting

Stage	Technique	Purpose
Input	Multi-view Images	Acquire multi-view observations of the scene
Initialization	SfM (COLMAP)	Estimate camera poses and generate an initial sparse point cloud
Scene Representation	Anisotropic Gaussian Primitives	Explicitly represent the scene using Gaussian primitives
Optimization	Differentiable Gaussian Optimization	Optimize Gaussian position, covariance, color, and opacity
Rendering	Gaussian Splatting	Render novel views in near real-time

다만 재현 품질은 입력 영상의 조건에 영향을 받으며, 야외 환경에서 품질을 저하시키는 요인은 선행연구를 종합할 때 크게 네 가지로 정리된다. 첫째, 사람과 차량 등 일시적 객체와 식생의 흔들림은 재구성 시 장면에 떠 있는 잡음 형태의 부유 가우시안(floater)이나 잔상(ghost artifact)을 생성한다(그림 1)[3],[4].

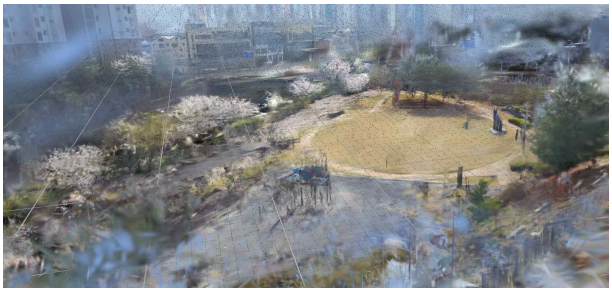


그림 1. 야외 촬영 결과에서 나타난 부유 가우시안과 잔상의 예
Fig. 1. Examples of floaters and ghost artifacts in outdoor capture results

둘째, 시점 간 조도가 달라지면 가우시안의 색이 평균값으로 수렴하면서 PSNR(Peak Signal-to-Noise Ratio) 손실이 발생한다[5]. 셋째, 카메라의 시점 배치와 촬영 거리가 적절하지 않으면 SfM 재구성 정확도가 저하된다[7]. 넷째, 하늘과 바닥 같은 저텍스처 영역은 특징점이 부족하여 SfM 매칭과 학습 모두에 부정적 영향을 미친다[4],[8]. 표면 텍스처가 SfM 결과에 미치는 영향은 정량적으로 보고된 바 있으며[8], fiducial marker[9]나 인공 배경[10]으로 저텍스처 환경의 매칭을 보완하려는 시도도 있었다.

이러한 한계 가운데 일시적 객체나 외관 변화는 학습 단계에서 이를 식별해 제거하거나 모델링하는 알고리즘 보완 연구로 일부 대응되어 왔다[3]-[5]. 다만 학습 단계의 보완이 모든 문제를 해결하는 것은 아니므로, 본 연구는 같은 한계를 촬영 단계에서 다루며 입력 데이터의 품질을 우선 확보하는 데 초점을 둔다.

2-2 촬영 변수에 관한 선행연구

Rangelov 등[6]은 카메라의 ISO, 셔터 스피드, 조리개가 재구성 품질에 미치는 영향을 통제 실험으로 비교하여, 실내 환경에서 ISO 200, 셔터 1/60 s, 조리개 f/3.5의 조합을 노이즈, 디테일, 밝기의 균형이 가장 양호한 설정으로 보고하였다. 다만 이는 실내 통제 환경의 결과로, 조도가 높고 변동성이 큰 야외 환경이나 조리개를 사용자가 임의로 설정할 수 없는 촬영 기기에는 그대로 적용하기 어렵다.

Liu 등[7]은 지상 SfM의 촬영 거리와 이미지 네트워크 기하가 측정 정확도에 미치는 영향을 통제 실험으로 비교하여, 수직 시점과 경사 시점을 결합한 구성이 가장 높은 정확도를 보였고 촬영 거리 단축의 이득도 그 구성에서 뚜렷함을 보고하였다. Alsadik 등[11]은 문화유산 3D 모델링의 자동 카메라 네트워크 설계에서 정확도와 촬영 수의 균형을 다루었다. SfM 기반 재구성에서는 개별 이미지의 해상도나 장비 성능뿐 아니라 인접 시점 간 중첩과 다시점 이미지 네트워크의 안정성이 중요하다[12]. 따라서 3DGS 재현 품질은 기기 사양만으로 결정되기보다 촬영 경로, 시점 배치, 입력 이미지 간 중첩과 같은 촬영 방법의 영향을 함께 받는다. 한편 Cho와 Woo[13]는 실내 모의 환경에서 3DGS의 정확도를 사례 기반으로 검증하였으나, 기하학적 정확도 지표에 초점을 두어 실제 야외 조형물의 시각 품질 변화와 촬영 방법의 관계는 다루지 않았다.

Rangelov 등[14]은 동일 장비와 설정을 유지한 채 카메라 방향, 이동 속도, 레이어 수, 스캐닝 경로를 한 번에 하나씩 바꾸며 실내 장면의 재구성 품질을 노이즈, 디테일, 데이터 밀도 기준으로 비교하였다. 그 결과 가로 방향, 느린 이동, 세 개의 레이어, 주요 객체 중심의 경로가 더 나은 결과를 냈으며, 공간 전체를 한 번에 촬영하기보다 구역으로 나누어 촬영할 때 품질이 개선된다고 보고하였다. 다만 분할 촬영한 결과를 하나로 결합하는 데에는 수작업이 필요해 전체 공간 재현에는 제약이 있다고 밝혔다. 이 연구는 촬영 방법의 최적화에 초점을 두었고, 통제된 실내를 대상으로 하여 야외 환경으로의 확장을 후속 과제로 남겼다.

국내에서는 김준형, 이동엽[15],[16]이 3DGS 기반 실외 조형물의 디지털화 워크플로우와 제작 과정을 다루었다. 촬영부터 처리, 편집까지의 전반을 제시한 데 비해 본 연구는 그 가운데 촬영 방법에 초점을 둔다.

2-3 통합 촬영 전략의 구성

이상의 선행연구에서 촬영 단계와 관련된 요소를 정리하면 표 2와 같다. 각 요소는 3DGS 재현 품질에 영향을 미치는 것으로 보고된 사항이며, 본 연구는 이 요소들에 대응하는 촬영 지침을 종합하여 야외 환경에 적용할 통합 촬영 전략을 구성한다.

표 2. 3DGS 재현 품질에 영향을 미치는 촬영 요소와 선행연구
Table 2. Capture factors affecting 3DGS reproduction quality and prior-work basis

Researchers	Capture factor	Effect on 3DGS quality
Sabour et al. [3], Kulhanek et al. [4]	Transient objects, vegetation	Moving people, objects, and wind-blown vegetation produce floaters and ghost artifacts
Dahmani et al. [5], Rangelov et al. [6]	Illumination consistency	Lighting differences across views collapse Gaussian color toward an average, causing PSNR loss
Schönberger and Frahm [12]	Inter-view overlap	Sufficient overlap between adjacent frames stabilizes feature matching and pose estimation
Liu et al. [7], Rangelov et al. [14]	Capture path, viewpoint diversity	Viewpoint geometry, capture distance, and object-focused, zone-divided paths affect reconstruction accuracy and stability
Kulhanek et al. [4], Nielsen et al. [8]	Surface texture, sky region	Low-texture surfaces and sky lack feature points, hindering SfM matching

2-1에서 정리한 네 가지 한계에 대응하여, 본 연구는 모바일 촬영을 전제로 한 통합 촬영 전략을 표 3과 같이 구성하였다. 본 연구에서 촬영 방법은 카메라 동선과 구도뿐 아니라 입력 데이터 확보 방식인 영상 촬영과 프레임 추출까지 포함하는 현장 촬영 절차 전체를 가리킨다.

본 전략은 사전 촬영에서 관찰된 문제를 보완하기 위해 본 연구의 사후 촬영에 적용하였으며, 각 전략의 적용 절차와 사전, 사후 촬영 조건의 비교는 3-3에서 기술한다.

표 3. 야외 환경 한계와 대응 모바일 촬영 전략
Table 3. Outdoor limitations and corresponding mobile capture strategies

Researchers	Limitation	Mobile capture strategy
Sabour et al. [3], Kulhanek et al. [4]	Transient objects, foliage	Low-traffic time slots; wait until people exit the frame; release shutter when wind subsides
Dahmani et al. [5], Rangelov et al. [6]	Illumination change	Finish within 30 min; ISO 50, shutter 1/2000 s, HDR(High Dynamic Range) off (fixed across both sessions)
Schönberger and Frahm [12], Rangelov et al. [14]	SfM/COLMAP pose errors	Loop closure, virtual anchors, circular orbit, ~70% overlap between adjacent frames
Kulhanek et al. [4], Nielsen et al. [8]	Sky/ground low-texture	Frame texture-rich surfaces; tilt camera toward the ground to reduce sky proportion

Ⅲ. 본 론

3-1 연구 문제 및 방법

본 연구의 연구 문제는 다음과 같다.

RQ1. 통합 모바일 촬영 전략 적용 전후 야외 조형물의 3DGS 재현 품질에는 어떤 변화가 관찰되는가?

본 연구는 선행연구에서 보고된 촬영 요소들을 통합 촬영 전략으로 구성하고, RQ1은 전략 적용 전후의 정량 지표 비교를 중심으로 검토하며, 재현 결과물의 표현성과 실무 활용 가능성은 전문가 정성 평가를 통해 별도로 검토한다. 이를 위해 사전 촬영으로 기초 사례를 확보한 뒤, 2-3에서 구성한 통합 촬영 전략을 사후 촬영에 적용하여 비교용 3DGS 결과물을 생성하였다. 결과물 생성과 정량 평가의 세부는 3-4에서, 전문가 평가의 설계와 결과는 4-4에서 기술한다.

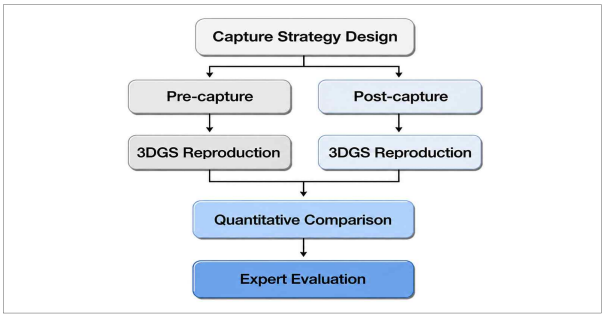


그림 2. 연구 프로세스 개요
Fig. 2. Research process overview

촬영 대상지는 경기도 시흥시 조남동에 위치한 따오기노래비공원이다. 이 공원은 동요 「따오기」의 노래비를 중심으로 조성된 야외 공공문화공간으로, 입구 따오기 조형물을 비롯해 감나무, 낚시꾼, 책, 윙크, 헤어밴드 등의 조형물로 구성된다. 야외에 상시 노출된 캐릭터와 문화 조형물 중심의 공공 설치 공간이라는 점에서 본 연구 대상지로 적합하다.



*Korean signage in the background was unavoidably captured at the public installation site and is unrelated to the content of this study.
그림 3. 시흥 따오기노래비공원 촬영 대상지
Fig. 3. Target outdoor sculptures at Ttaogi Norebi Park in Siheung

3-2 3DGS 처리 환경 및 파이프라인

3DGS 처리 환경으로는 4D NeRF 연구 사업의 일환으로 개발된 WithVision을 사용하였다. 이 도구는 사용자가 업로드한 영상 또는 이미지 시퀀스로부터 COLMAP 기반 SfM과 3DGS 학습을 자동으로 수행하고 결과를 점 기반 3D 데이터 형식인 PLY 파일과 웹 뷰어로 산출한다. SuperSplat이나 Postshot 등 다른 도구와 달리 WithVision은 브라우저 환경에서 영상 입력부터 학습과 뷰잉까지를 단일 절차로 제공하므로, 동일한 처리 절차를 여러 사례에 일관되게 적용하기에 적합하여 채택하였다. 본 연구의 단일 객체 처리에는 Basic 모드를 사용하였다.

3-3 촬영 전략의 현장 적용

통합 촬영 전략의 요소별 현장 적용은 표 4와 같다.

표 4의 노출 설정은 사전과 사후 두 세션에 동일하게 적용한 통제 조건이며, Rangelov 등[6]이 제시한 노출 통제 원리를 차용하되 조리개를 변경할 수 없는 모바일 환경에 맞게 수치를 재설정한 것이다. 셔터를 1/2000 s로 짧게 둔 것은 추출 프레임의 모션 블러를 줄여 SfM 매칭을 안정화하기 위함이다.

다만 인접 프레임 간 중첩 비율은 프레임 단위로 측정한 값이 아니므로 정량 검증 항목이 아닌 촬영 지침으로 간주한다.

표 4의 야외 환경 한계와 대응 전략을 기준으로 사전 촬영의 상태와 사후 촬영에서 조정한 내용을 표 5에 정리하였다. 본 연구의 사후 촬영은 이 요소들을 개별이 아닌 하나의 통합 전략으로 함께 적용한 것이다.

표 4. 통합 촬영 전략의 현장 사용
Table 4. Field application of the integrated capture strategy

Capture Factor	Applied Strategy	Field Application
Transient Objects and Vegetation	Minimize the influence of moving objects and vegetation	Low-traffic period, wait until people leave the frame, capture when wind subsides
Illumination Change	Control exposure conditions	30 min capture, ISO 50, Shutter 1/2000 s, HDR off, White Balance Auto
SfM/COLMAP Pose Errors	Stabilize camera pose estimation	Circular closed-loop path, Virtual Anchors, 70% frame overlap
Low-texture Regions	Increase the number of reliable feature points	Texture-rich surfaces, reduce sky proportion

표 5. 사전 촬영과 사후 촬영의 촬영 요소 비교
Table 5. Comparison of capture elements between pre- and post-capture

Capture element	Before (pre-capture)	After (post-capture)
Input format	Still photos	Video frame extraction (higher overlap)
Object path	Front-facing half-arc; rear from whole-scene selection	Object-centered circular orbit with loop closure
Capture height	Single height with up/down tilt	Low, middle, high layers
Capture distance	Near-uniform distance	Includes near and far variation
Sky proportion	Large sky inclusion	Lowered camera to minimize sky
Transient, illumination	Captured through people, objects, lighting change	Captured after frame clears and lighting stabilizes

3-4 실험 설계 및 평가 지표

객체별 상세 분석은 단일 촬영자가 모바일 기기로 수행한 사전 촬영과 사후 촬영 두 세션을 대상으로 한다. 본 연구에서 적용 전후를 비교하는 대상은 통합 촬영 전략이며, 처리 도구와 대상지는 동일하게 유지하였다. 분석 대상은 단일 객체 6종(감나무, 낚시꾼, 책, 윙크, 헤어밴드, 입구따오기)이다. 여섯 객체는 동일 대상지에서 유사한 시간대와 환경 조건을 공유하는 반복 사례로 두었다. 객체 간 형태와 크기 차이는 있으나, 본 연구는 동일한 통합 촬영 전략 적용 전후의 변화가 여러 객체에서 반복되는지를 검토한다.

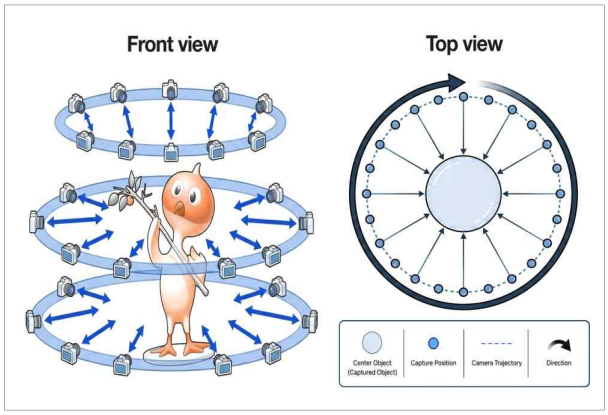


그림 4. 단일 조형물에 대한 원형 궤도 촬영 동선 (정면 및 상부)
Fig. 4. Circular orbit capture path for a single sculpture (front and top views)

입력 이미지 수가 두 세션 간에 다르면 그 자체가 향상의 원인이 될 수 있으므로, 각 객체의 사전 촬영 입력 수를 기준으로 사후 촬영 입력 수를 동일하게 맞추는 통제를 적용하였다. 한편 사전은 사진, 사후는 영상 프레임 추출로 입력 방식이 달랐다. 영상 전환은 인접 프레임 간 중첩을 늘리는 동시에 입력 방식 자체의 변화를 함께 가져왔다. 따라서 본 연구에서 검토하는 변화는 개별 촬영 요소의 단독 효과가 아닌 입력 방식 전환을 포함한 통합 촬영 전략 전체가 적용된 결과이며, 이 점은 본 연구의 해석 범위에 해당한다.

사후 촬영의 입력 이미지는 영상에서 프레임을 추출하여 확보하였다. 추출은 다음 절차를 모든 객체에 동일하게 적용하였다. 첫째, 목표 입력 수를 해당 객체의 사전 촬영 사진 장수로 정하여, 사진으로 촬영한 사전 촬영본과 영상으로 촬영한 사후 촬영본의 입력 데이터 수를 동일하게 맞추고자 하였다. 둘째, 블러 프레임을 제외한 뒤에도 목표 수를 확보할 수 있도록 영상 전 구간에서 시간적으로 균등하게 목표 수보다 여유 있게 프레임을 추출하고, 추출된 프레임 가운데 조형물의 윤곽선과 표면 문양이 인접 프레임에 비해 번진 프레임을 육안으로 검토하여 제외한 후 목표 수에 맞추어 최종 입력을 선별하였다. 객체별 영상 길이가 달라 고정 프레임 레이트는 적용하지 않았으며, 추출 간격은 목표 입력 수에 따라 객체별로 결정되었다. 모션 블러의 최소화는 충분한 중첩, 일관된 조명과 함께 재구성 품질의 전제 조건으로 제시된 바 있다[14]. 다만 객체별 추출 간격, 여유분 추출 수, 제외 프레임 수는 작업 당시 기록하지 않았으며, 블러 판단에 수치 임계값을 적용하지 않았다. 최종 입력 수는 표 6과 같다.

추가 모바일 기기와 미러리스 두 대로 촬영한 추가 사례는 객체별 분석에서 관찰된 개선 방향이 다른 촬영 사례에서도 반복되는지 확인하는 자료로 사용하였다. 추가 사례의 결과는 기기별로 구분하지 않고 하나의 종합 평균으로 보고한다.

재현 품질 평가로 PSNR, SSIM, LPIPS를 사용하였다. PSNR은 픽셀 단위 노이즈 비율을 측정하며 값이 클수록 우

표 6. 촬영 전략 적용 전후 객체별 결과
Table 6. Object-level results before and after applying the capture strategy

Object	Input images	Pre PSNR	Post PSNR	ΔPSNR	ΔSSIM	ΔLPIPS
Persimmon tree	182	17.97	20.60	+2.63	+0.250	−0.143
Fisherman	179	18.19	23.39	+5.20	+0.285	−0.184
Book	116	17.13	24.96	+7.83	+0.406	−0.177
Wink	52	16.89	20.89	+4.00	+0.339	−0.163
Hairband	51	15.61	19.11	+3.50	+0.193	−0.134
Entrance ibis	175	19.48	22.98	+3.50	+0.158	−0.167
Average	126	17.55	21.99	+4.44	+0.272	−0.161

수하다. SSIM(Structural Similarity Index Measure)은 0과 1 사이 값으로 1에 가까울수록 원본과 구조적으로 유사하다. LPIPS(Learned Perceptual Image Patch Similarity)[17]는 학습된 신경망의 특징 공간에서 인지적 유사도를 측정하며 값이 작을수록 원본에 가깝다.

한편 3DGS를 제안한 Kerbl 등[1]은 표준 벤치마크에서 평균 PSNR 약 23~29 dB를 보고하였고, 다른 선행연구는 PSNR 21 dB 안팎의 결과를 낮은 수준으로 평가한 바 있다[18]. 이처럼 기술 문헌에서 양호하다고 보는 정량 지표 수준과 실무 영상 작업에서 활용 가능하다고 판단되는 수준은 활용 목적에 따라 다를 수 있다. 따라서 본 연구는 PSNR, SSIM, LPIPS를 재현 품질의 정량적 변화 확인에 사용하고, 실무 활용 관점의 판단은 4-4의 전문가 정성 평가에서 별도로 다룬다.

3DGS 학습과 평가에 사용할 이미지의 분리는 연구자가 선택하지 않고 처리 도구의 자동 절차를 따랐다. 매칭에 성공한 이미지 가운데 약 1/8을 일정 간격으로 테스트셋으로 분리하고 나머지로 학습한 뒤, 분리된 시점에서 렌더링한 결과를 원본과 비교해 지표의 평균을 산출한다. 동일한 분리 규칙이 사전과 사후 두 세션에 같게 적용되었으며, 특정 시점을 선별하거나 제외하는 개입은 없었다. 따라서 본 연구의 지표는 학습에서 제외된 시점에 대한 hold-out view 평가에 해당한다. 다만 도구가 테스트셋 목록과 이미지별 로그를 제공하지 않고 표본 수가 작으며 변수 분리가 완전하지 않으므로, 통계적 유의성 검정 대신 변화량과 사례 해석을 중심으로 검토하였다.

Ⅳ. 실험 결과

4-1 본 실험 결과

단일 객체 6종의 촬영 전략 적용 전후 결과를 표 6에 정리하였다. 여섯 객체 모두 PSNR이 향상되었으며 평균 향상 폭은 4.44 dB였다. 향상 폭은 책에서 7.83 dB로 가장 컸고 낚시꾼이 5.20 dB, 감나무가 2.63 dB로 가장 작았으며, 규모가 가장 큰 입구따오기에서도 3.50 dB의 향상이 나타났다. SSIM은 여섯 객체 모두 상승하였고 LPIPS는 여섯 객체 모두 하락하였다. LPIPS는 값이 작을수록 원본에 가까우므로 이 하락은 개선에 해당하며, 표의 ΔLPIPS 음수 값은 개선을 의미한다. 이로써 구조적 유사도와 인지적 유사도에서 PSNR과 일치하는 변화가 나타났다.

표 5에서 정리한 사전, 사후 촬영 요소의 차이는 객체별 결과 해석과 연결된다. 사전에는 객체를 앞면 위주 반원 궤도로 담고 거리 변화 없이 단일 높이로 촬영해 시점이 한쪽에 치우쳤고, 사진 촬영으로 인해 인접 시점 간 중첩도 제한적이었다. 사후에 원형 궤도와 다층 높이, 거리 변화를 적용하고 영상으로 전환해 중첩을 늘린 결과, 사전에 형태와 텍스처가 불안정했던 객체에서 향상 폭이 크게 나타났다. 하늘이 다수 포함되어 부유 가우시안이 두드러졌던 사전 결과는 사후에 하늘 비중을 줄이면서 개선되었다. 다만 사후 촬영에서는 여러 요소를 동시에 조정하였고 입력 방식도 함께 바뀌었으므로, 개별 요소의 기여를 분리하기보다 통합 촬영 전략의 적용 전후 차이로 본다. 일부 사전 품질이 낮았던 객체에서 비교적 큰 향상이 나타났으나, 객체별 형태와 촬영 조건 차이가 함께 작용하므로 일반적인 상관으로 해석하지 않는다.



*Korean text in the background was unavoidably captured at the public installation site; the image is presented unedited as original data for reconstruction quality comparison.
그림 5. 대표 객체(감나무)의 원본 이미지
Fig. 5. Original image of the representative object (persimmon tree)



그림 6. 대표 객체(감나무)의 촬영 전략 적용 전 렌더 결과
Fig. 6. Reconstruction result of the representative object before applying the capture strategy



*Korean text in the background is reproduced from the original capture; the render is presented unedited to preserve the validity of the reconstruction comparison.

그림 7. 대표 객체(감나무)의 촬영 전략 적용 후 렌더 결과

Fig. 7. Reconstruction result of the representative object after applying the capture strategy

4-2 추가 사례 종합

표 7은 객체별 분석 사례와 추가 사례 종합의 단일 객체 기준 평균 변화량이다. 3-4에서 기술한 추가 사례는 기기별로 구분하지 않고 13개 사례를 종합하여 평균하였다. 종합 평균에서 PSNR은 1.20 dB 향상되었고 SSIM과 LPIPS도 개선 방향을 보였다. 다만 모든 사례에서 세 지표가 일관되게 개선된 것은 아니며, 향상 폭도 객체별 분석의 평균보다 작았다. 추가 13사례 중 9사례는 객체별 분석 사례와 동일하게 사전은 사진, 사후는 영상 입력이었고, 나머지 4사례는 사전과 사후 모두 영상 입력이었다. 입력 방식이 동일하게 유지된 이 4사례의 평균 향상 폭은 0.14 dB였다. 다만 이 4사례는 사전 평균 PSNR이 25.03 dB로 다른 사례들보다 높아 향상 여지가 작았던 조건이기도 하므로, 입력 방식 전환의 기여를 분리한 값으로 보기는 어렵다.

본 절의 분석은 13개 사례에 기반하여 통계적 유의성 검정에 충분한 규모가 아니며, 해석은 사례 기반 경향에 한정된다.

표 7. 객체별 사례와 추가 사례 종합의 정량 변화 요약

Table 7. Quantitative changes in the object-level cases and aggregated additional cases

Group	Cases	Pre PSNR	Post PSNR	ΔPSNR	ΔSSIM	ΔLPIPS
Six single-object cases	6	17.55	21.99	+4.44	+0.272	−0.161
Aggregated additional cases	13	21.55	22.75	+1.20	+0.124	−0.106

4-3 실험 결과 해석

실험 결과는 두 층위에서 해석된다. 단일 객체 6종에서는 전략 적용 후 세 지표가 모두 개선되어 적용 전후의 변화가 뚜렷하였고, 추가 사례 종합에서는 평균이 개선 방향을 보였으나 향상 폭이 작고 사례 간 일관성이 제한적이었다. 여섯 객체의 평균 PSNR은 사전 평균 17.55 dB에서 사후 평균 21.99 dB로, 4.44 dB 증가했다. 향상에 함께 작용한 촬영 요소로는 원형 궤도와 다층 높이 동선, 거리 변화, 하늘 비중 축소, 그리고 영상 전환에 따른 시점 중첩 증가가 있다. 이 요소들은 촬영 방법 가이드라인 표 10의 동선, 구도, 입력 항목으로 이어진다.

4-4 전문가 정성 평가

본 절에서는 재현 결과물의 표현성과 실무 활용 가능성을 전문가 정성 평가를 통해 검토한다. 재현 결과에 요구되는 품질은 기록, 배경 소재, 2차 제작의 기초 등 활용 목적에 따라 달라진다. 정량 지표는 학습에서 제외된 시점에 대한 재현 충실도를 측정할 뿐 특정 활용 목적에의 충분성을 직접 판단하지 않는다. 따라서 본 평가는 3-4의 정량 분석과 별개의 차원에서 활용 관점의 판단을 다룬다. 평가 대상은 사후 촬영으로 재현한 단일 객체 결과물이며, 표현성과 활용 가능성 두 축의 문항은 야외 환경의 한계 요인(일시적 객체, 조도 변화, 저텍스처 영역 등)에 대응하여 세분한다. 소수의 전문가를 대상으로 하므로 응답 정리와 사례 해석을 중심으로 분석한다.

평가자 구성에는 3D 그래픽 및 영상 분야의 실무 전문가 5인이 참여하였다. 게임 분야 3D 그래픽 실무자 3인, 모션 그래픽 디자이너 1인, 영화 및 VFX 분야 실무자 1인으로 구성되었으며, 모두 6년 이상의 실무 경력을 보유하였다. 이 중 4인은 NeRF/3DGS 등 3D 스캔 기술을 직접 접한 경험이 있었다. 성명은 선택적으로 수집하였으며, 분석 및 본문 제시 단계에서는 참여자를 전문가 A~E로 익명화하였다. 참여자의 세부 구성은 표 8과 같다.

표 8. 전문가 평가 참여자 구성

Table 8. Profiles of expert evaluators

Expert	Role	Domain	Career	3DGS Exp.
A	3D Graphic Artist	Game	12 yrs	No
B	Motion Graphic Designer	Motion Graphics	8 yrs	Yes
C	Post-production Supervisor	Film/VFX	17 yrs	Yes
D	3D Character Modeler	Game	9 yrs	Yes
E	3D Generalist	Game	6 yrs	Yes

평가는 가이드라인을 적용하지 않고 자유 동선으로 촬영한 결과물(A안)과 본 연구의 촬영 방법을 적용한 결과물(B안)을 함께 제시하고, 두 결과물을 비교 평가하는 방식으로 진행하였다. 평가 도구는 5점 리커트 척도 8문항과 자유서술 3문항으로 구성하였다. 리커트 문항은 표현성 축(전반적 시각 품질, 형태 및 윤곽 재현, 노이즈와 아티팩트 감소, 다시점 일관성)과 활용 가능성 축(방법론적 유효성, 전문 장비 없이 적용 가능한 현장 실무 대안성, 대규모 공간 적용 효율성, 디지털 아

카이빙 적용성)으로 구분된다. 자유서술 문항은 표현성 평가의 이유, 활용 가능성 평가의 이유, 그리고 촬영 방법의 장점, 한계, 향후 개선 사항을 묻는 세 항목으로 구성하였다.

리커트 문항의 응답 결과는 표 9와 같다. 표현성 축(2-1~2-4)은 전 문항 평균 4.50점으로, 전문가들은 전반적으로 B안을 A안보다 우수하게 평가하였다. 그중 형태 및 윤곽 재현(2-2)이 평균 4.8점으로 가장 높고 응답이 4~5점에 모여, 형태와 윤곽의 재현에 대한 긍정적 평가가 일치하였다. 반면 노이즈·아티팩트 감소(2-3)와 다시점 일관성(2-4)은 평균 4.4점으로 양호하였으나 응답이 3~5점에 걸쳐 분포하여 전문가 간 편차가 상대적으로 크게 나타났다. 활용 가능성 축(3-1~3-4)은 전 문항 평균 4.05점이었다. 방법론적 유효성(3-1)이 평균 4.8점으로 가장 높았던 반면, 대규모 공간 적용 효율성(3-3)은 평균 3.4점으로 가장 낮았다. 다만 3-3은 응답이 2점에서 5점까지 고르게 분포하여 전 문항 중 편차가 가장 컸고, 본 연구가 단일 객체를 대상으로 한 만큼, 대규모 공간으로의 확장은 추가 검증이 필요한 영역으로 지목되었다.

표 9. 전문가 평가 정량 결과(5점 척도)
Table 9. Quantitative results of expert evaluation (5-point scale)

Item	A	B	C	D	E	Mean
2-1 Overall visual quality	4	4	4	5	5	4.4
2-2 Shape & contour reproduction	5	5	4	5	5	4.8
2-3 Noise & artifact reduction	3	5	4	5	5	4.4
2-4 Multi-view consistency	5	5	4	3	5	4.4
3-1 Methodological effectiveness	5	5	4	5	5	4.8
3-2 Field applicability w/o pro equipment	4	4	4	3	3	3.6
3-3 Efficiency for large-scale spaces	3	3	4	5	2	3.4
3-4 Digital archiving applicability	5	5	4	4	4	4.4

자유서술 응답은 의미 단위로 검토하여 반복적으로 나타난 내용을 강점, 한계, 개선 방향의 세 범주로 분류하였으며, 하나의 응답이 복수 범주에 해당하는 경우 중복 분류하였다. 강점으로는 형태, 선명도의 개선과 모바일 촬영의 접근성이 여러 전문가에게서 공통적으로 언급되었다. 전문가 A는 A안보다 B안에서 조형물의 형태가 더 정확하고 뚜렷하며 표면 질감과 색에 따른 노이즈가 줄었다고 평가하였고, 전문가 B 역시 “노이즈와 아티팩트가 상당히 개선되었다”고 응답하며 형태가 명확하게 표현되었다고 보았다. 전문가 E는 비전문가도 알아볼 수 있을 만큼 B안이 더 깨끗하고 선명하다고 평가하였다. 활용 측면에서는 전문가 A가 로케이션에서 사실감 있는 프로토타입 에셋을 확보하는 용도로서 게임 콘텐츠 제작에서의 효용을 언급하였고, 전문가 C는 본 방법이 드론 촬영을 대체하기에 적합하다고 보았다.

한계로는 초점에서 벗어난 영역의 품질과 실무 적용에 대한 신중한 판단이 나타났다. 전문가 A는 초점이 맞은 조형물의 정확도는 기대 이상이지만, 초점을 벗어난 사물이나 질감의 부정확성은 대규모 야외 공간에서 제한적일 수 있다고 보았다. 전문가 D는 촬영이 간편하고 결과물도 그에 상응하지만 실무에 적용할 수 있을지는 아직 판단하기 어렵다고 보았다. 이러한 신중한 판단은 정량 결과에서 대규모 공간 적용 효율성(3-3)과 현장 실무 대안성(3-2)의 평균이 상대적으로 낮게 나타난 것과 맥을 같이한다. 한편 일부 전문가는 보다 세부적인 한계를 지적하였는데, 전문가 E는 소형 공간임에도 화면 외곽 영역의 마감과 비석의 미세한 글씨 같은 초근접 고주파 디테일이 일부 뭉개지는 현상을 언급하였다.

개선 방향으로는 후처리 품질과 촬영 단계의 보완이 제시되었다. 전문가 C는 하늘에 맺힌 빛이나 사물에 반사되는 빛을 선명하게 처리하는 후처리의 개선이 필요하다고 보았고, 전문가 E는 미세 디테일 보존을 위해 중요 영역에 대한 근접 촬영 패스를 추가하고 촬영 중첩률(overlap)을 보완할 것을 제안하였다. 이와 함께 전문가 B는 질적 평가와 더불어 정량 지표를 함께 확인할 수 있는 혼합적 평가 설계가 필요하다는 의견을 제시하였다.

종합하면, 가이드라인을 적용한 B안은 형태, 윤곽 재현과 전반적 시각 품질에서 A안보다 우수하게 평가되었으며, 모바일 기반의 접근성을 바탕으로 프로토타이핑, 아카이빙 등 실무 적용의 잠재력을 인정받았다. 반면 초점에서 벗어난 영역의 품질과 대규모 공간 적용 가능성에 대해서는 평균 점수가 낮거나 전문가 간 견해차가 크게 나타났다.

본 평가는 다음의 한계를 가진다. 참여자가 5인의 소표본이고 게임 분야 실무자의 비중이 높았으며, 공공미술, 문화유산 보존 또는 디지털 아카이빙 분야의 전문가는 포함되지 않았다. 따라서 디지털 아카이빙 적용성(3-4) 등 해당 영역의 결론을 본 결과로 일반화하기는 어렵다. 또한 A안과 B안이 동일한 시간대와 조도에서 통제되어 촬영되지 않아, 두 결과물의 차이를 촬영 가이드라인만의 효과로 귀속하기는 어렵다. 실제로 전문가 C 역시 두 결과물이 같은 시간대와 조명에서 얻어진 것이 아니어서 비교가 어렵다는 점을 지적하였다. 따라서 향후 연구에서는 동일 계절, 시간대를 유지한 채 가이드라인 적용 여부만 변화시키는 통제된 비교와, 전문가 평가 기준과 정량 지표를 통합하여 두 평가의 일치 여부를 검토하는 후속 연구가 요구된다.

V. 결 론

본 연구는 야외 조형물을 대상으로 모바일 통합 촬영 전략

을 적용하기 전과 후의 3DGS 재현 품질 변화를 사례 기반으로 검토하였다. 연구 방법은 시흥 따오기노래비공원의 단일 조형물 여섯 종을 대상으로, 사전 촬영에서 관찰된 문제와 선행연구를 토대로 통합 촬영 전략을 구성하고 적용 전후의 결과를 PSNR, SSIM, LPIPS 등 지표들로 비교 분석하였다. 연구 결과, 여섯 개 객체 모두에서 세 지표가 일관되게 개선된 것으로 나타났고, 추가 사례 종합에서도 개선 방향이 확인되었다. 동일한 처리 파이프라인 내에서 별도의 알고리즘 보완이나 장비 변경 없이 촬영 단계를 조정한 조건에서, 재현 품질의 개선과 연관된 경향이 사례 수준에서 관찰되었다.

전문가를 대상으로 한 정성 평가에서도 가이드라인을 적용한 결과물이 형태 및 윤곽 재현과 전반적 시각 품질에서 일관되게 높은 평가를 받았다. 이는 정량 결과와 같은 방향에서 모바일 촬영 기반 재현의 실무적 유효성을 뒷받침한다.

이 결과는 선행 연구와 일부 결을 같이한다. Rangelov 등[14]은 동일 장비와 설정에서 촬영 방법 요소를 하나씩 바꾸어 비교한 결과, 주요 객체 중심의 경로와 세 개의 레이어, 느린 이동이 더 나은 재구성 품질로 이어진다고 보고하였다. 본 연구에서 객체 중심의 원형 궤도와 다층 높이 동선을 적용한 뒤 여섯 객체의 품질이 개선된 결과는 이와 부합한다. 한편 Rangelov 등[14]이 통제된 실내를 대상으로 하였고 야외로의 확장을 후속 과제로 남겼는데, 본 연구는 실제 야외 공공 조형물을 촬영한 사례를 다룬다는 점에서 차별화된다. 카메라 노출 설정은 Rangelov 등[6]이 실내 환경에서 제시한 값과 달리 야외 조도와 모바일 제약에 맞추어 정하였다.

본 연구는 사례 분석에서 도출한 모바일 야외 3DGS 촬영 방법을 표 10의 가이드라인으로 정리하여 제시한다. 가이드라인은 동선 설계, 구도 설계, 입력 방식의 세 항목으로 구성된다.

표 10. 모바일 야외 3DGS 촬영 가이드라인
Table 10. Mobile-based outdoor 3DGS capture guidelines

Category	Guideline	Rationale
Path	Circular orbit with loop closure; multi-height capture; near/far distance variation; ~70% overlap between adjacent frames	Stable SfM pose (§3-3, [12])
Composition	Texture-rich surface centered; camera tilted toward the ground	Reduce sky / low-texture failure ([4],[8])
Input	Mobile video capture, then frame extraction	Inter-view overlap and consistency (§3-3)

본 연구는 단일 대상지와 제한된 표본 수에 기반한 사례 분석이라는 한계를 갖는다. 사전과 사후 사이에는 입력 방식 전환을 포함한 여러 촬영 요소가 함께 변화하여 전략 구성 요소별 기여를 분리할 수 없다는 한계가 있다. 또한 정량 평가가 hold-out view 지표에 의존한다는 제약도 있다. 두 세션의 입력 이미지가 서로 다르므로 분리된 테스트셋의 시점도 동일하지 않으며, 사전과 사후의 지표는 같은 시점을 직접 대응시킨 비교가 아니다. 아울러 프레임 선별 절차의 추출 간격과 제외 프레임 수를 기록하지 않아 입력 데이터 구성의 재현에 제약이 있다. 후속 연구로는 전략 구성 요소별 기여를 분리하는 추가 실험, 다양한 기기와 대상지로의 사례 확장, 그리고 전문가 평가에서도 추가 검증이 필요하다고 지목된 공간 단위 재현으로의 확장이 필요하다.

감사의 글

본 연구는 문화체육관광부 및 한국콘텐츠진흥원의 2024년도 문화체육관광 연구개발사업으로 수행되었음(과제명: Near Real 4D Nerf 기반의 VFX 시스템 'WITH' 개발 인력 양성, 과제번호: RS-2024-00349479, 기여율: 100%).

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, pp. 1-14, July 2023. https://doi.org/10.1145/3592433

[2] B. Mildenhall, P. P. Srinivasan, M. Tancik, J. T. Barron, R. Ramamoorthi, and R. Ng, "NeRF: Representing Scenes as Neural Radiance Fields for View Synthesis," in *Proceedings of the 16th European Conference on Computer Vision (ECCV)*, Glasgow: UK, pp. 405-421, August 2020. https://doi.org/10.1007/978-3-030-58452-8_24

[3] S. Sabour, L. Goli, G. Kopanas, M. Matthews, D. Lagun, L. Guibas, ... and A. Tagliasacchi, "SpotLessSplats: Ignoring Distractors in 3D Gaussian Splatting," *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 44, No. 2, pp. 1-11, April 2025. https://doi.org/10.1145/3727143

[4] J. Kulhanek, S. Peng, Z. Kukelova, M. Pollefeys, and T. Sattler, "WildGaussians: 3D Gaussian Splatting in the Wild," in *Proceedings of the 38th Conference on Neural Information Processing Systems (NeurIPS)*, Vancouver, Canada, pp. 21271-21288, December 2024. https://doi.org/10.52202/079017-0670

[5] H. Dahmani, M. Bennehar, N. Piasco, L. Roldão, and D. Tsishkou, "SWAG: Splatting in the Wild Images with Appearance-Conditioned Gaussians," in *Proceedings of the 18th European Conference on Computer Vision (ECCV)*, Milan, Italy, pp. 325-340, October 2024. https://doi.org/10.1007/978-3-031-73116-7_19

[6] D. Rangelov, S. Waanders, K. Waanders, M. van Keulen,

and R. Miltchev, “Impact of Camera Settings on 3D Reconstruction Quality: Insights from NeRF and Gaussian Splatting,” *Sensors*, Vol. 24, No. 23, 7594, November 2024. https://doi.org/10.3390/s24237594

[7] J. Liu, S. Ma, R. Chen, C. Han, Y. Li, K. Ma, and Y. Zhang, “Influence of Photography Distance and Image Network Geometry on Ground-Based SfM Photogrammetry Accuracy,” *Research in Cold and Arid Regions*, in press, November 2025. https://doi.org/10.1016/j.rcar.2025.11.001

[8] M. S. Nielsen, I. Nikolov, E. K. Kruse, J. Garnæs, and C. B. Madsen, “Quantifying the Influence of Surface Texture and Shape on Structure from Motion 3D Reconstructions,” *Sensors*, Vol. 23, No. 1, 178, January 2023. https://doi.org/10.3390/s23010178

[9] J. DeGol, T. Bretl, and D. Hoiem, “Improved Structure from Motion Using Fiducial Marker Matching,” in *Proceedings of the 15th European Conference on Computer Vision (ECCV)*, Munich, Germany, pp. 281-296, September 2018. https://doi.org/10.1007/978-3-030-01219-9_17

[10] D. Sun, H. Wang, H. Komine, H. Tsunai, D. Ito, G. Pan, and K. Ruan, “Improved SfM-MVS Approach Using Artificial Backgrounds,” *Soils and Foundations*, Vol. 64, No. 5, 101495, October 2024. https://doi.org/10.1016/j.sandf.2024.101495

[11] B. Alsadik, M. Gerke, and G. Vosselman, “Automated Camera Network Design for 3D Modeling of Cultural Heritage Objects,” *Journal of Cultural Heritage*, Vol. 14, No. 6, pp. 515-526, December 2013. https://doi.org/10.1016/j.culher.2012.11.007

[12] J. L. Schönberger and J.-M. Frahm, “Structure-from-Motion Revisited,” in *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, Las Vegas: NV, pp. 4104-4113, June 2016. https://doi.org/10.1109/CVPR.2016.445

[13] S. Cho and T. Woo, “Accuracy of Three-Dimensional Gaussian Splatting for Virtual Crime Scene Reconstruction,” *Frontiers in Computer Science*, Vol. 8, 1755361, February 2026. https://doi.org/10.3389/fcomp.2026.1755361

[14] D. Rangelov, S. Waanders, K. Waanders, M. van Keulen, and R. Miltchev, “Impact of Data Capture Methods on 3D Reconstruction with Gaussian Splatting,” *Journal of Imaging*, Vol. 11, No. 2, 65, February 2025. https://doi.org/10.3390/jimaging11020065

[15] J. H. Kim and D. Y. Lee, “A Workflow for Outdoor Sculpture Digitization Based on 3D Gaussian Splatting,” in *Proceedings of the 2025 KSBDA Fall International Conference,* Jeonju, pp. 257-260, November 2025.

[16] J. H. Kim and D. Y. Lee, “A Study on Digital Sculpture Production Using 3D Gaussian Splatting Technique,” *Journal of Basic Design & Art*, Vol. 26, No. 6, pp. 55-67, December 2025. https://doi.org/10.47294/KSBDA.26.6.5

[17] R. Zhang, P. Isola, A. A. Efros, E. Shechtman, and O. Wang, “The Unreasonable Effectiveness of Deep Features as a Perceptual Metric,” in *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, Salt Lake City: UT, pp. 586-595, June 2018. https://doi.org/10.1109/CVPR.2018.00068

[18] S.-J. Cho, H.-G. Lee, H.-W. Kang, M.-H. Yeom, and J.-Y. Kim, “Study on Synthetic Data-Based Camera and Shooting Environment Setup for D-NeRF and 4DGS Capture,” *Journal of Digital Contents Society*, Vol. 26, No. 8, pp. 2115-2130, August 2025. https://doi.org/10.9728/dcs.2025.26.8.2115



김상호(Sang-Ho Kim)

2019년～2020년: ㈜그린웹서비스
2022년～2023년: IOFXMMC 주임 연구원
2025년～현 재: 엘라스틱토이랩(Elastic Toy Lab) 운영/ 미디어아트 작가
2025년～현 재 : 홍익대학교 영상·커뮤니케이션대학원, 영상디자인 전공 석사
※관심분야 : 3DGS, 미디어아트, 영상디자인, 모션그래픽, VFX



문주연(Ju-Yeon Moon)

2020년～현 재: 주식회사 메가텐트 이사
2025년～현 재 : 홍익대학교 영상·커뮤니케이션대학원, 게임콘텐츠 전공 석사
※관심분야 : 3DGS, 게임 콘텐츠, 게임 광고 영상, 애니메이션, 게임 내러티브



이가은(Ga-Eun Lee)

2020년～2020년: ㈜디스패치뉴스그룹
2022년～2022년: LOFT VFX STUDIO
2022년～2023년: ㈜어거스트스튜디오스
2023년～현　재: 메가스터디교육㈜
2025년～현　재 : 홍익대학교 영상·커뮤니케이션대학원, 영상디자인 전공 석사
※관심분야 : 3DGS, 모션그래픽, 영상디자인, VFX, AI, 애니메이션



송한주(Han-Ju Song)

2021년～2023년: (주) 디바스 주임 연구원
2023년～2025년: 와이드브레인 주임 연구원
2025년～현　재 : 홍익대학교 영상·커뮤니케이션대학원, 게임콘텐츠 전공 석사
※관심분야 : 3DGS, 게임 콘텐츠, 3D 모델링



김지윤(Jee-Youn Kim)

2001년 : 이화여자대학교 조형예술대학교, 정보디자인과 시각디자인 전공 학사
2004년 : School of Visual Arts, MFA Computer Art 석사
2014년 : 이화여자대학교 일반대학원, 영상디자인 전공, 디자인학 박사
2004년～2006년: MTV Networks, Nickelodeon, US & Korea
2006년～2011년: CJ ENM, 투니버스
2011년～2013년: Walt Disney Company Korea
2016년～2017년: 동국대학교 교수
2018년～현　재: 홍익대학교 영상·커뮤니케이션대학원 부교수
※관심분야 : 방송 및 영상 브랜드 마케팅, 방송영상 및 애니메이션 제작, VFX, 영상 융합 디자인, AI, NeRF