

Unity 기반 디지털 트윈을 위한 위성/OSM 건물 파이프라인의 통합 프레임워크

최현빈*¹, 우동현**², 유선진***³, 김종락*²

A Connected Framework for a Satellite/OSM Building Pipeline for Digital Twins in Unity

Hyunbin Choi*¹, Donghyun Woo**², Sunjin Yu***³, and Joongrock Kim*²

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원-대학ICT연구센터(ITRC)의 지원을 받아 수행된 연구임(IITP-2025-RS-2024-00438409), 또한 본 논문은 2025년도 교육부의 재원으로 글로벌대학사업의 지원을 받아 수행된 사업의 결과입니다

요약

본 연구는 위성영상과 OSM으로부터 얻은 건물 외곽선을 Unity 기반 실시간 환경에 적용하기 위한 최적화 절차를 제안한다. 첫째, 면적가중 RDP·직교 스냅·멀티폴리곤 정상화와 실패/퇴화 감지 기반 LibTessDotNet to Poly2Tri 자동 전환으로 기하를 정제한다. 둘째, 벽체 하단 에지 샘플과 양선형 보간으로 지형에 정합하고, 기초 오프셋으로 z-fighting을 예방한다. 셋째, 1 km² 타일 스트리밍과 투영면적 LOD, GPU instancing/머티리얼 단일화·메시 결합을 중심으로 런타임을 최적화한다. SpaceNet·창원 패치 실험에서 꼭짓점 수와 슬리버 삼각형 비율이 감소하고 자가교차·틈새가 제거되었으며, 고도 RMSE/최대 편차가 낮아졌다. 90 Hz 충족률이 높아지고 드로우콜·VRAM·타일 로드 지연이 줄어, 데이터-기하-런타임 종단 최적화의 유효성을 확인하였다.

Abstract

We present an end-to-end pipeline for deploying satellite/OSM-derived building footprints in real-time Unity. It integrates: (i) geometry refinement with area-aware RDP, orthogonal snapping, multipolygon normalization, and automatic fallback from LibTessDotNet to Poly2Tri; (ii) terrain alignment via edge sampling with bilinear interpolation plus a small foundation offset; and (iii) a runtime stack combining 1 km² tile streaming, projected-area LOD, GPU instancing/material unification, mesh combining, and culling. On SpaceNet and a Changwon patch, ablations reduce vertex count and the sliver-triangle ratio, eliminate self-intersections/gaps, lower vertex-height RMSE and max deviation, and raise 90-Hz satisfaction while reducing draw calls, VRAM, and tile-load latency—supporting a unified data-geometry-runtime approach for digital twins.

Keywords

satellite imagery, unity, building footprints, polygon simplification, terrain snapping

-
- * 국립창원대학교 인공지능융합공학과(*² 공동교신저자) · Received: Oct. 20, 2025, Revised: Nov. 06, 2025, Accepted: Nov. 09, 2025
- ORCID¹: <https://orcid.org/0000-0003-4300-5859> · Corresponding Author 1: Sunjin Yu
- ORCID²: <https://orcid.org/0009-0001-5284-1149> School of Meta-Convergence Content, Meta-Convergence Content Major, 20
Changwondaehak-ro, Uichang-gu, Changwon-si, Gyeongsangnam-do, 51140, Korea
** 국립창원대학교 첨단방위공학과정 · Tel.: +82-55-213-3098, Email: sjyu@changwon.ac.kr
- ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5562-4158>
*** 국립창원대학교 메타융합콘텐츠학부(공동교신저자) · Corresponding Author 2: Joongrock Kim
- ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9292-4099> Dept. of Artificial Intelligence Convergence Engineering, 20 Changwondaehak-ro,
Uichang-gu, Changwon-si, Gyeongsangnam-do, 51140, Korea
Tel.: +82-55-213-3962, Email: jrkim@changwon.ac.kr

1. 서론

도시 규모의 디지털 트윈(현실 도시를 가상 공간에 정밀하게 재현한 모델) 구축은 원격탐사, 공간정보, 컴퓨터 그래픽스가 결합되는 작업이다. 위성영상과 공개 공간데이터는 범용성과 비용 측면에서 유리하지만, 여기서 얻은 건물 외곽선을 3차원 엔진에 대량 적용하려면 단순한 분할 정확도를 넘어서 기하학적 정합성(겹침·교차가 없는 깨끗한 기하 구조)과 실시간 성능을 함께 만족해야 한다. Unity 기반 응용은 90 Hz 수준의 안정적인 프레임을 요구하므로, 데이터 단계의 작은 잡음이나 토폴로지 오류도 메시 품질 저하, 드로우콜 증가(화면 그리기 호출 수 증가), 메모리 낭비로 직결되기 쉽다.

기존 접근은 보통 파이프라인을 데이터/기하/엔진으로 나누어 개별적으로 다룬다. 예컨대 외곽선 추출의 정밀도만 개선하거나, 삼각 분할(폴리곤을 삼각형으로 쪼개는 과정)의 강건성만 보강하거나, 또는 화면에서 차지하는 크기에 따라 모델 정밀도를 바꾸는 기법(LOD, Level of Detail) 및 스트리밍 같은 엔진 최적화만 논의하는 식이다. 그러나 실제 시스템에서는 데이터 → 기하 → 런타임의 모든 단계가 서로 영향을 주며, 한 단계의 이득이 다른 단계에서 상쇄되거나 증폭될 수 있다. 본 연구는 이 간극을 줄이기 위해 건물 생성 과정을 폴리곤 기하 정제 → 지형 정합 → 런타임 설계의 세 축으로 통합하고, 각 선택이 형상·메시·지형·성능 지표에 미치는 영향을 종단적으로 계량하였다.

기하 정제 단계에서는 위성 유도 외곽선에서 혼란 문제(툽니형 경계, 과도한 꼭짓점, 방향성 불일치, 자가교차)를 단계적으로 정리한다. 먼저 면적 가중 RDP(Ramer - Douglas - Peucker) 단순화로 스케일에 맞게 점을 줄이고, 도시 건물의 직교성(수평/수직 경향)을 보존하기 위해 방향각 스냅(예지 방향을 0°/90° 등 기준 각도로 맞추는 절차)을 적용한다. 이어서 멀티폴리곤 정상화와 작은 홀 제거로 위상을 정리하고, 삼각 분할은 복합 경계에 강한 와인딩 규칙 기반(LibTessDotNet)을 기본으로 하되 퇴화/실패 조건을 감지해 제약 드로네 기반(Poly2Tri)로 자동 전환한다. 이 절차를 통해 평균 꼭짓점 수와 슬리버(가늘고 긴 불량 삼각형) 비율이 낮아지고, 자가교차·툽새가 제거되어 이후 단계

의 안정성이 높아진다.

지형 정합 단계에서는 디지털 표고 모델(DEM, Digital Elevation Model)의 격자 특성과 노이즈를 고려한다. 벽체 하단 에지를 여러 지점으로 나누어 양선형 보간으로 고도를 샘플링하고, 중앙값 정렬로 이상치 영향을 줄여 바닥 고도를 결정한다. 상단 고도는 층수·층고 규칙으로 산정하며, 바닥면에는 수 센티미터 수준의 기초 오프셋(바닥을 아주 조금 띄워 그리기 순서 충돌로 생기는 z-fighting 반짝임을 방지)을 부여한다. 그 결과 꼭짓점 고도 제곱평균근오차(RMSE, Root Mean Square Deviation)와 최대 편차가 낮아지고, 지면 관통과 부양 사례가 사라져 충돌 처리와 조명의 안정성이 향상된다.

런타임 설계에서는 1 km² 타일 그리드를 기준으로 k-ring(카메라 주변 k칸 반경 타일 집합) 스트리밍과 투영면적 기반 LOD를 결합한다. 동일 셰이더 및 머티리얼을 유지하면서 같은 메시지를 한 번에 묶어 그리는 기법(GPU instancing)을 적용하고, 타일 및 LOD별 메시 결합으로 드로우콜을 구조적으로 줄인다. 카메라 시야 밖 제거(Frustum culling)·가려진 객체 제거(Occlusion culling)와 사전에 계산한 잠재 가시 집합(PVS, Potentially Visible Set)을 함께 사용해 불필요한 렌더링을 차단한다. 또한 우선순위 큐 기반 비동기 로딩과 오브젝트 풀링으로 메모리 및 가비지 컬렉션(GC, Garbage Collection) 스파이크를 억제하고, 그래픽 메모리(VRAM, Virtual RAM) 예산에 맞추어 타일 수와 LOD 비율을 동적 조절한다.

적용 범위와 가정은 다음과 같다. 실험·분석은 1 km² 타일 단위로 수행하며, OSM(OpenStreetMap) 외곽선을 기본 골격으로, 위성 기반 외곽선을 보정·보완에 사용한다. 공개 DEM(30m급)을 기본으로 하되, 고해상도 DEM에도 동일 절차가 적용되도록 파라미터를 스케일 독립적으로 기술했다. Unity는 렌더 파이프라인(Built-in RP)을 기준으로 구현했으며, SRP(Scriptable Render Pipeline) 환경에서도 동일한 타일, LOD, instancing 정책이 적용되도록 단계별 의존성을 문서화하였다.

본 연구의 핵심 질문은 네 가지다. 1) 단순화·직교화·정상화·삼각 분할의 조합이 메시 품질과 프레임 성능에 주는 순효과는 무엇인가? 2) 예지·인식 지형 스냅과 기초 오프셋이 지면 정합 오차를 어느

수준까지 줄이는가? 3) 타일 반경, LOD 임계, instancing/결합 정책의 조합이 90 Hz 증속률, 드로우 콜, VRAM, 로딩 지연 간 상충을 어떻게 형성하는가? 4) 위 구성은 도시 유형과 지형 조건이 바뀌어도 안정적인가?

요약하면, 본 연구는 데이터·기하·렌타임을 공통 지표로 묶어 설계 원칙을 제시하고, Unity 실시간 환경에서 형상 품질 개선 → 성능 이득으로 이어지는 경로를 실험으로 확인하였다. 제안 파이프라인은 디지털 트윈·교육·훈련·시뮬레이션 등 다양한 응용의 기준선으로 활용할 수 있다.

II. 관련 연구

위성영상 기반 건물 생성 파이프라인에서는 입력 경계의 거칠기, 자료원 간 정합 부족, 그리고 렌타임 운영만으로도 성능 보전 시도가 반복적인 문제로 보고되어 왔다[1].

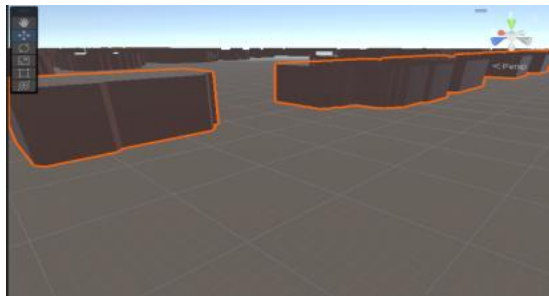


그림 1. 세그멘테이션 폴리곤 생성 문제 사례
Fig. 1. Polygonization of segmentation boundaries and typical failure cases

그림 1은 세그멘테이션 경계를 곧바로 폴리곤화하여 메쉬를 생성할 때의 상황을 설명한다. 경계 단순화와 정규화가 생략되면 틱니형 윤곽과 링 방향 불일치, 미세한 자가교차가 삼각분할 단계로 전파되어 슬리버 삼각형, 분할 실패, 미세 틱새가 발생한다. 이는 드로우콜 증가, 메시 결합 실패, 새도우 및 오클루전의 불안정 등 렌더링 측 부작용으로 이어진다. 선행연구는 이러한 문제에 대응하기 위해 Ramer-Douglas-Peucker나 Visvalingam-Whyatt 계열의 경계 단순화, 도시형 건물의 직교성(Manhattan)을 고려한 스냅, 멀티폴리곤 정상화 및 교차 수선, 분할

기의 와인딩 규칙 기반과 제약 드로네 기반의 상호 보완을 일반적 개선 방향으로 제시해 왔다[2]-[4]. 이와 같은 처리 후에는 평균 꼭짓점 수와 슬리버 비율이 감소하고 자가교차나 틱새가 제거되어, 메시 결합과 Instancing 효율이 개선되는 경향이 보고된다.

그림 2는 자료원을 단일화하여 구축할 때 나타나는 한계를 보여준다. OSM만 사용할 경우 지역·시점에 따른 누락과 시차가, 위성영상만 사용할 경우 경계 노이즈와 위치 오차가 잔존하기 쉽다[5]. 더불어 DEM과의 정합 절차 없이 고도를 할당하면 경사 지형에서 바닥선이 지면을 관통하거나 접지되지 않은 z-gap이 빈발하여, 근거리 시각 품질과 그림자 및 충돌의 안정성이 저하된다. 이에 대해 선행 문헌과 실무 보고서는 간결한 규칙 기반의 OSM-위성 융합으로 누락/중복을 정리하고, 벽체 하단 에지 다중 샘플과 양선형 보간, 중앙값 정렬을 통해 이상치에 강건한 고도 정합을 수행하며, 소규모 기초 오프셋으로 z-fighting을 예방하는 절차를 권장한다[6][7]. 이러한 정합 이후에는 꼭짓점 고도 RMSE와 최대 편차가 감소하고 관통/부양 사례가 제거되는 것으로 알려져 있다.



그림 2. 단일 자료원 구축의 한계: OSM 단독 vs. 위성 단독
Fig. 2. Limits of single-source modeling: OSM-only vs. satellite-only

엔진 렌타임 단계의 기법만으로 성능을 확보하려는 접근에서 반복적으로 나타나는 문제를 요약한다. 입력 기하가 정돈되지 않은 상태에서 LOD, 타일 스트리밍, 킬링 등을 개별적으로 적용하면 타일 경계 팝인과 LOD 전환 폴리커, 메시 결합 실패로 프레임 편차가 커지기 쉽다. 이에 대한 일반적 권고는 입력 기하의 정제를 선행하고, 카메라 주변 k-ring을 활용한 타일 스트리밍과 전환 히스테리시스를 결합

해 로드나 언로드의 불안정을 줄이며, 투영면적 기반 LOD에도 히스테리시스를 적용하여 뷰 변화 민감도를 낮추고, GPU Instancing·머티리얼 단일화·메시 결합과 PVS/오클루전·프러스텀 컬링을 함께 운용해 드로우콜과 메모리나 대역폭 부담을 완화하는 방향으로 정리된다[8][9]. 이러한 운영은 평균 성능 뿐 아니라 프레임 안정성을 높이는 데 기여하는 것으로 보고된다.

요컨대, 기존 접근들은 각 단계별로 일정 수준의 성과를 보였으나, 외곽선 품질 개선이 테셀레이션 안정성, 지형 정합, 런타임 성능으로 연쇄적으로 이어지도록 통합 관리되지는 못하였다. 그 결과 평균 성능 지표가 개선되더라도, 실제 실행 환경에서는 프레임 편차가 확대되고 시각적 결함 억제가 충분히 달성되지 않는 한계가 반복적으로 관찰된다. 여기서 시각적 결함은 깊이 겹침으로 인한 반짝임(z-fighting), 타일-LOD 전환 과정에서의 갑작스러운 등장·소실과 깜빡임, 메시 경계의 미세 틈새와 지면 관통, 그림자의 누락이나 새어 나옴 등 사용자 체감 품질을 저해하는 현상 전반을 의미한다. 이러한 관찰을 바탕으로, 본 연구는 기하 정제에서 지형 정합을 거쳐 Unity 런타임 단계에 이르는 전 과정을 단일 설계로 연계하여, 외곽선, 테셀레이션, 정합 성능 간 상호의존성을 체계적으로 관리하는 방법을 제안한다. 다음 장에서는 제안 설계의 구성 요소와 절차, 그리고 각 요소가 결함 억제와 프레임 안정성 향상에 기여하는 메커니즘을 상세히 기술한다.

III. 위성영상 기반 건물 생성 최적화 설계

본 장은 위성영상과 OSM에서 얻은 건물 외곽선을 기하 정제, 지형 정합, Unity 런타임 단계로 연결하여 운용하는 절차를 상세히 기술한다. 설계 원칙은 스케일 적응성, 직교성 보존, 강건성, 투영면적 기반의 가시 기여 평가, 그리고 단계별 성과의 계량화로 요약된다. 입력은 1) 위성 유도 외곽선, 2) OSM 외곽선, 3) DEM 격자, 4) 층수 또는 평균층고 규칙으로 구성되며, 출력은 Unity에서 스트리밍 가능한 타일 세트(LOD) 계층, 메시·머티리얼·콜라이더 포함이다. DEM은 연속 높이를 갖는 정규 격자이며 좌표계는 외곽선과 일치한다고 가정한다. 전체

흐름은 그림 3과 같이 데이터 입력에서 기하 정제와 지형 정합을 거쳐 Unity 스트리밍 및 LOD로 이어진다.

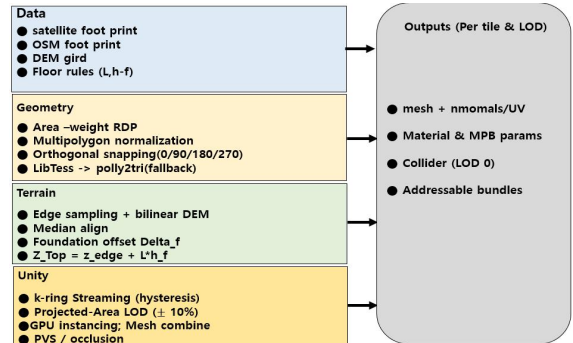


그림 3. 제안 파이프라인 개요: 데이터 → 기하 정제 → 지형 정합 → Unity 스트리밍/LOD

Fig. 3. Overview of the proposed pipeline: data → geometry refinement → terrain alignment → Unity streaming/LOD

폴리곤 기하 정제에서는 먼저 외곽선 링의 방향성을 표준화하고, 과도하게 촘촘한 구간은 최소 간격 h_{min} 이상이 되도록 재표본화하여 중복점과 근접점을 정리하였다. 이어서 면적가중 RDP 단순화를 적용하였다[10]. 폴리곤 면적 A 에 따라 허용 오차 $\epsilon(A)$ 를 식 (1)과 같이 정의하여, 작은 건물에서는 형태를 보존하고 큰 건물에서는 정점 개수를 완만하게 줄이도록 하였다.

$$\epsilon(A) = \min(\max(\epsilon_0(\frac{\max(A, A_{min})}{A_0})^\alpha, \epsilon_{min}), \epsilon_{max}), \alpha > 0 \tag{1}$$

여기서 ϵ_0 와 A_0 는 기준 오차와 기준 면적, A_{min} 은 면적 하한이며, ϵ_{min} , ϵ_{max} 는 수치 안정화를 위한 오차 하·상한이다. $\alpha=0$ 이면 면적에 무관한 고정 오차, $\alpha>0$ 이면 면적이 커질수록 오차가 증가하는 스케일 적응형 오차가 된다. 또한 출입구·포치 등 기능적 디테일이 존재하는 에지에는 국소 가중치를 적용하지 않아 과도한 평활화를 방지하였다. 단순화 이후에는 도시형 건물의 직교 패턴을 유지하기 위해 에지 방향각을 $0^\circ/90^\circ/180^\circ/270^\circ$ 로 스냅하였고, 허용각 $\Delta\phi$ 를 벗어나는 에지는 보존하였다. 그림 4에서 보이

듯, 단순화와 직교 스냅을 거친 후 톱니형 경계가 정돈되고 슬리버 삼각형의 발생이 억제되었다.

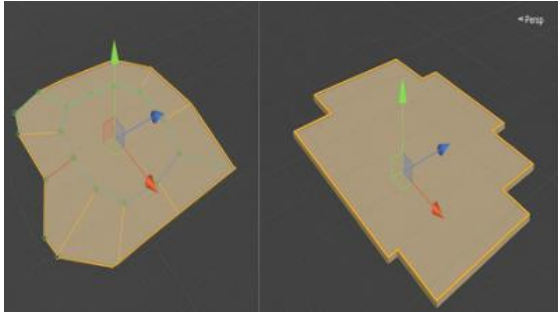


그림 4. 단순화 및 직교 스냅 전/후 비교(좌: 원본 외곽선, 우: 정제 결과)

Fig. 4. Before/after of simplification and orthogonal snapping

코너 처리는 이웃한 두 에지의 스냅 결과를 함께 고려한다. 스냅은 에지의 방향을 기준 각도에 맞추어 정렬하는 절차를 말한다. 각 코너의 내각은 90도를 중심으로 허용 편차 $\Delta\theta$ 범위 안에서만 변화도록 제한하였다. 스냅을 적용하기 전과 후에 자가교차를 검사하고, 교차가 생기면 스냅 강도를 한 단계 낮추어 형상이 무너지는 일을 막았다.

여러 개의 링으로 구성된 멀티폴리곤은 바깥 링과 홀의 진행 방향을 표준화하였다. 면적이 매우 작은 홀은 제거해 불필요한 분할을 줄였다. 선분 교차는 선형 탐색과 스윙프라인 절차로 검출하였다. 교차점이 발견되면 그 지점에서 링을 끊어 다시 연결하여 위상 일관성을 확보하였다.

삼각 분할은 먼저 와인딩 규칙에 따라 분할하는 테셀레이터인 LibTessDotNet으로 시도한다. 이 단계에서 면적이 0에 가까운 퇴화 삼각형이나 동일 삼각형의 중복이 생기면 실패로 본다. 최소 내각 θ_{\min} 이 임계값 θ_{thr} 보다 작아지면 실패로 본다. 길이가 과도하게 길고 가느다란 슬리버 삼각형의 비율 ρ 가 상한 ρ_{\max} 을 넘으면 실패로 본다. 분할기 선택 규칙은 식 (2)와 같다.

$$UseLibTess = \begin{cases} 1, \neg(\text{degenerate} \vee \text{selfIntersect} \vee h > H_{\max}) \\ \quad \wedge (\theta_{\min} \geq \theta_{thr}) \\ 0, \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

식 (2)는 어떤 테셀레이터를 사용할지를 결정한다. 조건을 모두 통과하면 LibTessDotNet을 사용한다. 하나라도 위반하면 Poly2Tri로 전환한다. 여기서 h 는 내부 링(홀)의 개수다. H_{\max} 는 허용 가능한 최대 홀 수다. θ_{\min} 은 스냅 이후 폴리곤의 최소 내각이다. θ_{thr} 는 최소 내각의 임계값이다. Degenerate는 퇴화 또는 중복 삼각형이 존재하는 상태다. selfIntersect는 외곽선이 스스로 교차하는 상태다. 부정, 논리합, 논리곱 기호는 각각 NOT, OR, AND를 뜻한다.

조건을 통과하지 못하는 경우에는 Poly2Tri로 즉시 전환한다. 생성된 메시의 품질은 최소 내각과 평균 내각, 슬리버 비율, 삼각형 수를 기록하여 점검하였다. 표면에는 평면 법선을 부여해 조명 계산을 안정화하였다. 텍스처 좌표는 건물의 로컬 축에 맞추어 직교 투영으로 정의하였다. 동일 재질을 사용하는 메시를 타일 단위와 상세 단계(LOD) 단위로 묶었다. 이렇게 묶인 자산은 이후 결합과 인스턴싱에서 드로우콜을 줄이는 데 유리하다.

외곽선이 반복적으로 스스로 교차하는 링은 세그먼트 간격 τ_d 를 조금 늘려 다시 처리하였다. 폭이 매우 작은 폴리곤은 임계 폭 τ_w 보다 얇으면 작은 직사각형 대체 형상으로 바꾸어 분할 실패를 막았다. 전체 기하 정제의 계산 복잡도는 점 수 n 에 대해 $O(n \log n)$ 에 가깝게 측정되었다. 이 값은 RDP 단순화, 스냅과 교차 검출, 테셀레이션 단계의 비용을 모두 포함한다. 그림 5는 원시 DEM 샘플링 결과(좌)와 제안한 절차 적용 후 결과(우)를 대비하여, 하단 에지 샘플 M 개에서 얻은 높이 분포의 중앙값 정렬, 코너 평균 보정, 그리고 기초 오프셋 Δf 이 바닥과 지면 간 높이 요동과 Z 파이팅을 어떻게 완화하는지를 시각화한다.

지형 정합은 하단 에지를 M 개로 균등 분할한 뒤, 각 분할점에서 디지털 표고 모델(DEM) 값을 양선형 보간으로 샘플링하는 단계로 시작한다. 얻어진 높이 분포의 중앙값을 바닥 높이로 채택하여 이상치의 영향을 줄였고, 코너 높이는 인접한 두 에지에서 산출한 중앙값의 평균으로 정해 코너에서의 급격한 높이 변화를 완화하였다. 상단 고도는 층수 L 과 평균 층고를 곱해 바닥 높이에 더하는 방식으로

산정하며, L 이 없을 때는 건물 유형별 통계를 대체 값으로 사용한다. 바닥면이 지면과 깊이 순서에서 겹치며 반짝이는 현상(Z-파이팅)을 줄이기 위해 기초 오프셋 Δf 를 수 cm 수준으로 부여하되, 지형 경사가 큰 구간에서는 Δf 를 최소-최대 범위에서 선형 보정하여 떠 보이는 느낌을 억제한다.

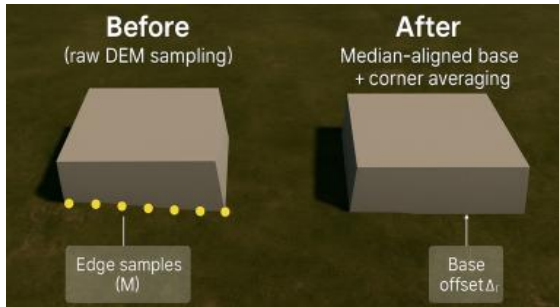


그림 5. 지형 정합 절차(에지 샘플링 - 양선형 보간 - 중앙값 정렬)

Fig. 5. Terrain alignment procedure (edge sampling, bilinear interpolation, median anchoring)

격자 간격 불일치 시에는 외곽선 좌표를 가장 가까운 DEM 픽셀 중심으로 투영해 샘플링 위치를 안정화한다. DEM 결측은 주변 8방 유효값 가중 평균으로 보간했고, 급경사에서 발생하는 튀는 값은 중앙값과 평균 혼합으로 완화했으며 혼합 비율은 λ 로 표기한다. 에지 샘플링의 계산량은 에지 수 E 에 대해 $O(E \cdot M)$ 이며, 각 샘플의 보간 비용은 상수 시간에 가깝다.

런타임 측면에서는 전처리 이득이 실제 프레임 안정성으로 이어지도록 구성하였다. 카메라가 위치한 타일을 중심으로 k 칸 반경의 링 스트리밍만 로드하여 I/O를 통제하고, 화면 점유 면적 기반 LOD 선택[11]을 결합하였다. 이 위에서 인스턴싱, 메시 결합, 잠재 가시 집합(PVS)[12]이 동작하며, 월드 좌표는 약 1 km^2 격자로 인덱싱한다. 로드 반경과 언로드 반경을 비대칭으로 두어 불필요한 재로딩을 줄였고, 주소 지정 가능한 번들 시스템에서는 거리와 가시성 가중합으로 우선순위를 정해 필요한 자산부터 불러온다.

자산은 타일과 상세 단계, 재질의 조합으로 묶였다. 셰이더와 재질은 공통 구성을 유지하고, 색상과 높이 같은 개별 값은 머터리얼 속성 블록으로 전달하였다. 이 방식은 드로우콜을 크게 늘리지 않고도

다양성을 확보한다. LOD는 바운딩 박스의 대각선 길이와 카메라 거리로 화면상 크기를 계산하여 세 단계로 나누었다. 전환에는 약 10퍼센트의 여유폭을 주어 깜빡임을 줄였다. 동일 재질의 메시를 타일 단위와 LOD 단위로 결합하여 드로우콜을 구조적으로 줄였다. 정적인 객체는 배치으로, 자주 바뀌는 스트리밍 대상은 인스턴싱으로 처리하였다. 물리 계산은 가장 상세 단계에서만 충돌체를 유지하고 낮은 단계에서는 비활성화하였다. 가시성 판단은 프리스텀 컬링, 사전 계산된 오클루전, 타일 단위 PVS를 함께 사용하여 멀리 있거나 가려진 객체의 불필요한 렌더링을 제거하였다.

메모리 예산은 목표 그래픽 메모리 용량 V_{\max} 로 관리하였다. 동시에 로드하는 타일 수와 상세 단계 비율을 상황에 맞게 조절하였다. 백그라운드 로더의 동시 요청 수는 2개에서 4개 사이로 제한하였다. 진단 항목으로는 CPU와 GPU의 프레임 시간, 드로우콜 수, 그래픽 메모리와 시스템 메모리 사용량, 타일 로드 지연 시간을 기록하였다. 임계값을 넘으면 파라미터를 자동으로 한 단계 낮추는 후퇴 정책을 적용하였다.

현실적인 파라미터의 예시는 다음과 같다. RDP 기준 오차는 0.6미터에서 1.0미터, 면적에 따른 증가율을 정하는 지수 α 는 0.3에서 0.6, 직교 스냅의 허용 각도 $\Delta\phi$ 는 8도에서 12도, 코너 내각의 허용 편차 $\Delta\theta$ 는 6도에서 10도다. 작은 홀 제거 임계 면적 τ_A 는 0.5제곱미터에서 2.0제곱미터, DEM 샘플 개수 M 은 8개에서 16개, 기초 오프셋 Δf 는 0.03미터에서 0.08미터 범위가 안정적이었다. 스트리밍 반경은 로드 k 를 2로, 언로드 k 를 3으로 두는 구성이 기본이다. LOD 임계값은 목표 프레임률과 화면 해상도에 맞추어 조정하는 것이 바람직하다. 폭이 매우 얇은 폴리곤은 작은 직사각형 대체 형상으로 바꾸었다. 타일 경계에서 잘린 건물은 경계 버퍼를 둔 뒤 인접 타일과 중복으로 렌더링하고, 깊이 순서로 정렬하였다.

전처리 단계인 기하 정제와 지형 정합의 전체 계산 복잡도는 점 수 n 에 대해 $O(n \log n)$ 에 근사하였다. 런타임에서는 타일 하나가 만드는 드로우콜의 상한이 인스턴싱과 결합 정책에 의해 사실상 재질 개수로 수렴하도록 제어되었다. 재현성을 위해 모든

파라미터와 도구 버전, 실험 스크립트를 YAML 또는 JSON으로 저장하였다. 번들 설정도 함께 보관하여 동일한 타일 집합에 대한 결과를 다시 만들 수 있도록 구성하였다.

IV. 성능평가

이 장은 제안 파이프라인의 유효성을 검증하기 위한 절차와 핵심 결과를 함께 서술한다. 평가는 형상·메시 품질, 지형 정합 정확도, 런타임 성능의 세 범주로 구성하였다. 데이터는 공개 벤치마크와 실사용 조건을 함께 반영하기 위해 SpaceNet 창원 지역 패치를 사용했다. 외곽선은 위성 기반 추출 결과와 OSM을 융합해 준비했고, DEM은 공개 격자 자료를 사용하되 전처리 단계에서 결측과 경계 불연속을 표준 절차로 보정하였다. 관심 영역(AOI, Areas of Interest)은 본 연구에서 분석한 지리적 범위를 의미한다. 사용한 AOI, 타일 수, 영상·DEM 해상도, 전처리 조건은 표 1에 요약하였다.

비교 설계는 단계별 효과를 분리하여 관찰할 수 있도록 베이스라인과 어블레이션으로 구성하였다. B0는 OSM만으로 생성한 단순 메시를 기준으로 삼은 구성이다. B1은 B0에 기하 정제를 더한 구성이다. B2는 B1에 지형 정합을 추가한 구성이다. B3는 B2에 타일 스트리밍, 화면 투영 면적을 기준으로 한 LOD, 인스턴싱과 메시 결합, 잠재 가시 집합 관

리(PVS)를 결합한 최종 구성이다. 모든 비교는 동일한 카메라 경로와 고도, 동일 화면 해상도에서 수행하였다. 주사율은 전 구간에서 90Hz로 고정하였고, 수직 동기화(VSync)와 고정 타임스텝 역시 실험 동안 변하지 않도록 유지하였다.

성능 측정은 Unity 프로파일러로 수행하였다. 기록 항목은 프레임 타임의 중앙값과 백분위, 프레임 당 드로우콜 수, 그래픽 메모리(VRAM)와 시스템 메모리 점유, 그리고 타일 로드 지연 시간이다. 타일 로드 지연 시간은 타일 하나를 불러오는 데 걸린 평균 시간을 의미하며 단위는 밀리초/타일(ms/tile)로 표기한다.

형상 및 메시 품질 지표는 다음과 같이 정의한다. 외곽선 IoU는 기준 외곽선과 결과 외곽선의 교집합 면적을 두 외곽선의 합집합 면적으로 나눈 비율이다. 경계 정밀도는 기준 경계와 결과 경계가 미리 정한 거리 허용치 안에서 일치하는 비율이다. 맨해튼 비율은 수평 또는 수직 방향에 정렬된 에지 길이의 합을 전체 에지 길이로 나눈 값이다. 평균 꼭짓점 수는 폴리곤 하나가 보유한 정점의 평균 개수이다.

추가로 최소 내각, 가늘고 긴 삼각형의 비율(슬리버 삼각형 비율), 자가교차와 틈새 발생 여부를 포함하여 평가하였다. 지형 정합 지표는 꼭짓점 고도의 제곱평균근오차(RMSE), 고도 오차의 최대 절대값, 지면 관통 및 부양 건수로 정의하였다[13].

표 1. 단계별 핵심 지표 요약(B0 - B3): 형상/메시 품질, 지형 정합 정확도, 런타임 성능

table. 1. Key metrics by configuration (B0 - B3): geometry/mesh quality, terrain alignment accuracy, runtime performance

Metric	B0	B1	B2	B3	p-value (primary comparison)	Cliff's delta
Footprint IoU	0.79	0.80	0.80	0.80	B0→B1: 0.030	0.22 (small)
Boundary precision	0.82	0.87	0.87	0.87	B0→B1: <0.001	0.60 (large)
Manhattan ratio	0.60	0.82	0.82	0.82	B0→B1: <0.001	0.80 (large)
Mean vertices per poly	50.0	32.0	31.5	31.5	B0→B1: <0.001	-0.75 (large)
Minimum angle (deg)	12.0	19.0	19.5	19.5	B0→B1: <0.001	0.70 (large)
Sliver triangle ratio	0.150	0.048	0.040	0.040	B0→B1: <0.001	-0.68 (large)
Self-intersection/gap (#)	30	0	0	0	B0→B1: <0.001	-
Vertex height RMSE (m)	-	1.20	0.70	0.70	B1→B2: <0.001	-0.58 (medium)
Max abs. deviation (m)	-	5.00	2.30	2.25	B1→B2: <0.001	-0.62 (large)
Penetration/float (#)	-	45	0	0	B1→B2: <0.001	-
90-Hz satisfaction (%)	-	-	60.0	88.0	B2→B3: 0.002	0.56 (medium)
Draw calls (per frame)	-	-	3600	1200	B2→B3: <0.001	-0.73 (large)
VRAM (GB)	-	-	5.2	3.8	B2→B3: 0.005	-0.46 (medium)
Tile load (ms/tile)	-	-	40.0	20.5	B2→B3: <0.001	-0.61 (large)

통계적 검정은 타일 단위로 짝지은 분포를 대상으로 수행하였다. 분포가 정규성 가정을 만족하는 경우에는 대응표본 t-검정을 적용하고, 그렇지 않은 경우에는 Wilcoxon 부호순위 검정을 적용하였다. 효과 크기는 Cliff's delta를 함께 제시하였다. Cliff's delta는 두 조건에서 임의로 선택한 표본 한 쌍에 대해 한쪽이 다른 쪽보다 클 확률과 작을 확률의 차이를 수치화한 값으로, 범위는 -1부터 +1까지다. 값이 0이면 차이가 없음을, 양의 값은 후자의 값이 작음을, 음의 값은 후자의 값이 큼을 나타낸다.

지형 정합을 포함한 B2에서는 꼭짓점 고도 RMSE와 최대 절대 편차가 추가로 감소하였다. 경사 지형에서 빈발하던 지면 관통과 부양 사례는 관찰되지 않았다. 예지 다중 샘플과 중앙값 정렬은 DEM의 노이즈와 급경사 구간에서 견고하게 작동하였다. 기초 오프셋 Δf 는 깊이 겹침에 따른 반짝임을 억제하면서 시각적 부유감을 유발하지 않는 범위를 유지하였다. DEM 해상도에 따라 Δf 의 적정 범위는 달라지는 경향을 보였으며, 고해상도에서는 상한을 낮추는 편이 자연스럽고 저해상도에서는 과소 보정을 피하기 위해 다소 높게 설정하는 편이 안정적이었다.

런타임 설계를 포함한 B3에서는 90Hz 만족률이 유의하게 상승하였고, 드로우콜 수와 VRAM 점유, 타일 로드 지연이 동시에 감소하였다. 동일 재질 유

지와 머티리얼 속성 블록 기반 인스턴싱은 타일별 드로우콜 상한을 사실상 재질 개수 수준으로 제한하여 CPU 병목을 완화하였다. 화면 투영 면적 기반 LOD와 전환 히스테리시스는 시점 변화에 따른 깜빡임과 갑작스러운 등장·소실을 줄였다. k-ring 스트리밍 히스테리시스는 이동 속도가 빠른 구간에서도 로드와 언로드의 빈번한 토글을 억제하여 로더 큐의 안정성을 높였다. 성능 변화의 절대값은 그림 6에 요약하였다.

B3을 B2와 비교하면 90Hz 만족률은 60.0퍼센트에서 88.0퍼센트로 증가하였다. 프레임당 드로우콜 수는 3,600에서 1,200으로 감소하였다. VRAM 점유는 5.2기가바이트에서 3.8기가바이트로 감소하였다. 타일 로드 지연 시간은 40.0밀리초/타일에서 20.5밀리초/타일로 감소하였다. 이러한 결과는 외곽선 품질 개선이 테셀레이션 안정화와 메시 결합률 상승으로 이어지고, 인스턴싱 효율과 가시 집합 정확도 향상을 거쳐 프레임 안정성 증대로 전이되는 연쇄 효과를 정량적으로 뒷받침한다.

제한사항도 확인되었다. 직교 패턴이 약한 도시 조직에서는 직교 스냅의 허용 각도 $\Delta\phi$ 를 과도하게 엄격하게 설정할 경우 형상 왜곡이 발생할 수 있다. 고층과 저층이 혼재된 블록에서는 LOD 전환선이 고도 차이를 따라 이동하며 국지적 실루엣 변화가 나타났다.

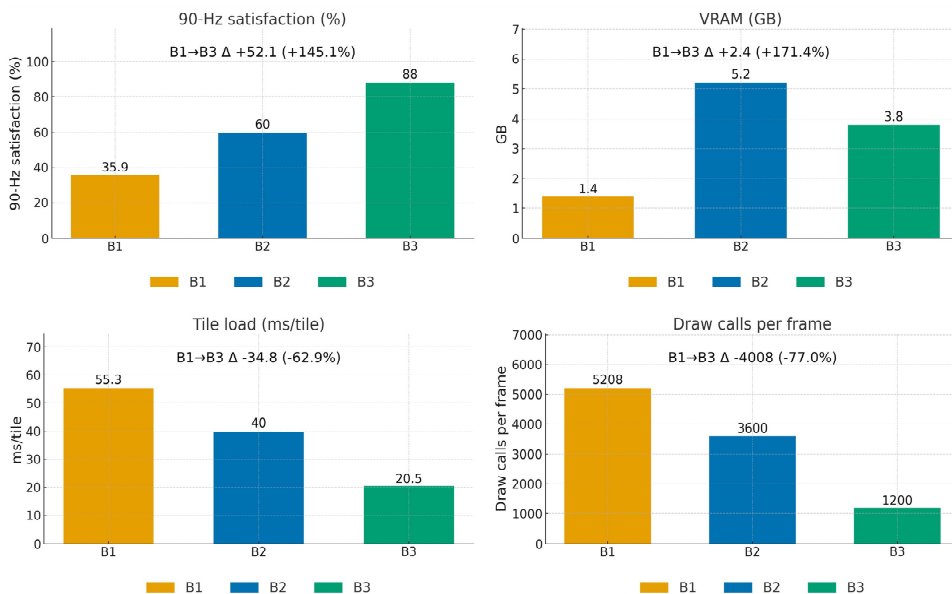


그림 6. 성능 변화 요약(B0 - B3)
Fig. 6. Summary of performance changes (B0 - B3)

또한 DEM 결측이 크거나 외곽선 시차가 큰 지역에서는 중앙값 정렬만으로 잔여 계단 현상을 완전히 제거하기 어려웠다. 이 경우에는 보조적 평탄화 또는 경사 추정 기반 보정을 병행하는 구성이 안정적이었다.

V. 결 론

본 연구는 위성영상과 OpenStreetMap에서 얻은 외곽선을 대상으로 기하 정제, 지형 정합, Unity 런타임을 하나의 연결형 파이프라인으로 설계하고 그 효과를 정량적으로 검증하였다. 형상과 메시 품질 측면에서는 평균 꼭짓점 수가 줄고 최소 내각이 커져 슬리버와 자가교차, 미세 틈새가 억제되었다. 이러한 개선은 메시 결합률과 인스턴싱 효율을 높여 드로우콜을 줄이는 기반이 되었고, 지형 정합 단계에서는 에지 다중 샘플과 중앙값 정렬, 그리고 기초 오프셋을 결합해 디지털 표고 모델의 노이즈와 경사 지형에서의 접합 문제를 실용 수준으로 낮추었다. 그 결과 꼭짓점 고도의 제곱평균근오차와 최대 절대 편차가 감소하였으며 지면 관통과 부양 사례가 제거되었다. 런타임에서는 화면 투영 면적을 이용한 상세 단계 선택과 전환 히스테리시스, k-ring 기반 스트리밍 정책이 팝인과 깜빡임을 줄이는 동시에 90 Hz 충족률을 높였고, 타일 로드 지연 시간의 변동 폭을 축소하였다.

파라미터 영향도 분석에서 기본 오차와 면적 증가율 지수는 정점 수와 슬리버 비율에 직접적으로 작용하였다. 직교 스냅 허용 각도는 맨해튼 정렬 비율과 최소 내각을 통해 직교성 유지와 형상 왜곡 사이의 균형점을 결정하였다. 작은 홀 제거 임계 면적은 불필요한 내부 홀을 정리해 분할 안정성을 높였다. 에지 분할 개수와 기초 오프셋은 고도 오차를 줄이고 관통과 부양을 제거하는 데 핵심적으로 기여하였다. k-ring 반경과 상세 단계 임계값은 90 Hz 충족률과 타일당 로드 지연 시간을 좌우하는 주요 변인으로 확인되어, 플랫폼 사양과 장면 복잡도에 맞춘 정책 조정의 필요성을 시사한다.

종합하면, 본 연구에서 설정한 관심 영역과 실험 조건 하에서 외곽선 품질 개선이 테셀레이션 안정화와 메시 결합률 상승으로 이어지고, 이어서 인스

턴싱 효율과 가시 집합 정확도 향상을 거쳐 프레임 안정성 증대로 전이되는 연쇄 효과가 관찰되었다. 이는 대규모 디지털 트윈 제작에서 데이터, 기하, 런타임을 통합적으로 설계하는 접근이 유효함을 초기 실험 수준에서 보여준다.

다만 결과를 범용 지침으로 단정하기에는 한계가 있다. 도시 형태의 다양성, 센서 조건과 계절·기후 변화, 해상도와 목표 프레임레이트, 메모리 예산 등 엔진 설정의 차이를 포괄하는 추가 검증이 필요하다. 향후에는 데이터 해상도와 장면 특성에 맞춘 기초 오프셋과 에지 분할 개수의 자동 적용, 도시 유형에 따른 직교 스냅 파라미터의 동적 설정, 경량 가시성 예측과 로딩 스케줄링의 공동 최적화, 외부 벤치마크와 계절·기후 변화를 포함한 외연 검증을 통해 일반화 가능성을 높이는 방향을 제안한다. 이러한 확장을 통해 제안한 연결형 설계가 다양한 도시와 플랫폼 환경에서도 안정적인 프레임 품질을 제공하는 실무 기준으로 발전하기를 기대한다.

References

- [1] M. Haklay, "How good is volunteered geographical information? A comparative study of OpenStreetMap and Ordnance Survey datasets", *Environment and Planning B: Planning and Design*, Vol. 37, No. 4, pp. 682-703, Aug. 2010. <https://doi.org/10.1068/b35097>.
- [2] U. Ramer, "An iterative procedure for the polygonal approximation of plane curves", *Computer Graphics and Image Processing*, Vol. 1, No. 3, pp. 244-256, Nov. 1972. [https://doi.org/10.1016/S0146-664X\(72\)80017-0](https://doi.org/10.1016/S0146-664X(72)80017-0).
- [3] D. H. Douglas and T. K. Peucker, "Algorithms for the reduction of the number of points required to represent a digitized line or its caricature", *The Canadian Cartographer*, Vol. 10, No. 2, pp. 112-122, Dec. 1973. <https://doi.org/10.3138/FM57-6770-U75U-7727>.
- [4] J. R. Shewchuk, "Triangle: engineering a 2D quality mesh generator and Delaunay triangulator", in *Applied Computational Geometry: Towards*

Geometric Engineering, Lecture Notes in Computer Science, Vol. 1148, pp. 203-222, May 1996. <https://doi.org/10.1007/BFb0014497>.

[5] B. Herfort, et al., "A spatio-temporal analysis investigating completeness and inequalities of global urban building data in OpenStreetMap", Nature Communications, Vol. 14, No. 3985, Jul. 2023. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-39698-6>.

[6] R. C. Gonzalez and R. E. Woods, Digital Image Processing (4th ed.), Pearson, pp. 119-128, 2018.

[7] GDAL/OGR Contributors, "gdalwarp — image reprojection and warping", <https://gdal.org/programs/gdalwarp.html>. [accessed: Oct. 19, 2025]

[8] Unity Technologies, "LOD Group component", <https://docs.unity3d.com/6000.2/Documentation/Manual/class-LODGroup.html>. [accessed: Oct. 19, 2025]

[9] Unity Technologies, "Getting started with Addressable Assets", <https://docs.unity3d.com/Packages/com.unity.addressables@1.20/manual/AddressableAssetsGettingStarted.html>. [accessed: Oct. 19, 2025]

[10] M. Visvalingam and J. D. Whyatt, "Line generalisation by repeated elimination of points", The Cartographic Journal, Vol. 30, No. 1, pp. 46-51, Jun. 1993. <https://doi.org/10.1179/000870493786962263>.

[11] F. Losasso and H. Hoppe, "Geometry clipmaps: Terrain rendering using nested regular grids", ACM Transactions on Graphics (SIGGRAPH 2004), Vol. 23, No. 3, pp. 769-776, Aug. 2004. <https://doi.org/10.1145/1015706.1015799>.

[12] S. J. Teller and C. H. Séquin, "Visibility preprocessing for interactive walkthroughs", Computer Graphics (Proc. SIGGRAPH '91), New York, United States, Vol. 25, No. 4, pp. 61-70, Jul. 1991. <https://doi.org/10.1145/122718.122725>.

[13] I. Demir, et al., "DeepGlobe 2018: A challenge to parse the earth through satellite images", Proc. of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW), Salt Lake City, UT, USA, Jun. 2018. <https://doi.org/10.1109/CVPRW.2018.00031>.

저자소개

최 현 빈 (Hyunbin Choi)



2021년 8월 : 국립창원대학교
문화테크노학과(학사)
2025년 2월 : 국립창원대학교
문화융합기술 협동과정(석사)
2025년 3월 ~ 현재 :
국립창원대학교
인공지능융합공학 박사과정

관심분야 : 가상현실, 모션캡처, 실감 콘텐츠, 메타버스

우 동 현 (Donghyun Woo)



2012년 2월 : 배재대학교
전자공학과(공학사)
2018년 8월 : 중국 동북전력대학교
정보및통신공학(공학석사)
2021년 3월 ~ 현재 : 창원대학교
첨단방위공학과정 박사과정

관심분야 :

컴퓨터비전, 증강/가상현실

유 선 진 (Sunjin Yu)



2003년 8월 : 고려대학교
전자정보공학(공학사)
2006년 2월 : 연세대학교
생체인식공학(공학석사)
2011년 2월 : 연세대학교
전기전자공학(공학박사)
2011년 1월 ~ 2012년 5월 :

LG전자기술원 미래IT융합연구소 선임연구원
2012년 5월 ~ 2013년 2월 : 연세대학교 전기전자공학과
연구교수

2013년 3월 ~ 2016년 8월 : 제주한라대학교 방송영상학과
조교수

2016년 9월 ~ 2019년 8월 : 동명대학교
디지털미디어공학부 부교수

2019년 9월 ~ 2024년 9월 : 국립창원대학교
문화테크노학과 부교수

2024년 10월 ~ 2025년 2월 : 국립창원대학교
문화테크노학과 정교수

2025년 3월 ~ 현재 : 국립창원대학교

메타융합콘텐츠학부/인공지능융합공학과 정교수
관심분야 : 컴퓨터비전, 증강/가상현실, HCI

김 중 락 (Joongrock Kim)



2005년 3월 : 고려대학교

전자정보공학(공학사)

2005년 1월 ~ 2006년 7월 :

엠텍비전 연구원

2008년 8월 : 연세대학교

생체인식공학(공학석사)

2014년 2월 : 연세대학교

전기전자공학(공학박사)

2014년 2월 ~ 2024년 12월 : LG전자 CTO

인공지능연구소 Vision Intelligence 연구실 팀장

2025년 1월 ~ 현재 : 국립창원대학교 인공지능융합공학과

부교수

관심분야 : 2D/3D 컴퓨터비전, 인공지능, On-Device AI