

영상기반 전통 목조 건축물 공포(栱包)의 3D 복원 및 분할에 관한 연구

고종국, 이승재

한국전자통신연구원

jgko@etri.re.kr, seungjlee@etri.re.kr

요약

전통 목조 건축물의 보존과 연구를 위해서는 정밀한 3차원 복원이 필수적이다. 특히 공포(栱包) 부재는 구조적·미학적 핵심 요소로서, 정확한 디지털 복원이 문화재 보존 및 학술 연구에 중요한 의미를 지닌다. 본 연구는 영상 기반 3차원 복원 기법과 3차원 분할(segmentation) 기술을 결합하여, 전통 목조 건축물의 공포 부재를 정밀하게 복원하고 구성 요소 단위로 분할하는 방법을 제안한다. 우선 소수의 입력 영상으로부터 구조-모션(Structure-from-Motion, SfM)과 다중 시점 스테레오(Multi-View Stereo, MVS) 알고리즘을 활용하여 공포 부재의 정밀 3차원 모델을 생성한다. 이후 복원된 점군(point cloud)에 대하여 AGILE3D 모델 기반의 상호작용형 다중 객체 분할 기법을 적용함으로써, 공포 부재를 구조적 단위별로 효율적으로 분할한다. 실험 결과, 본 연구의 방법은 기존 사진만으로는 파악하기 어려운 공포의 세부 구조를 재현할 수 있었으며, 사용자의 최소한의 입력만으로도 복원된 3차원 모델을 정밀하게 분할하는 결과를 보였다. 이러한 결과는 전통 목조 건축물의 디지털 보존, 학술 연구, 가상 전시, 그리고 후속 복원 사업에 실질적인 기여를 할 것으로 기대된다.

I. 서론

3차원 복원 기술은 문화유산 보존, 가상 전시, 건축 연구 등 다양한 분야에서 핵심적인 역할을 하고 있다. 특히 한국 전통 목조 건축물은 고유한 구조적 특징과 세부 장식 요소를 지니며, 그중 공포는 지붕의 하중을 기둥으로 전달하는 동시에 장식적 가치도 갖는 핵심 부재이다. 그러나 이러한 공포는 세밀한 조형적 특성으로 인해 단순 2차원 영상이나 평면 도면만으로는 정밀한 구조 이해가 어렵다. 따라서 영상 기반 3차원 복원 기술을 활용한 공포의 디지털화는 문화재 연구와 보존에 있어 중요한 의미를 갖는다. 최근 구조-모션(Structure-from-Motion, SfM)[3]과 다중 시점 스테레오(Multi-View Stereo, MVS)[4] 기법은 소수의 영상으로부터 정밀한 3차원 점군을 생성할 수 있는 방법[1]으로 주목받고 있다. 이를 통해 한국 전통 건축물의 공포 부재를 비교적 적은 수의 사진만으로도 정밀하게 복원할 수 있음이 입증되었다. 그러나 이러한 복원 결과는 전체 텍스처 매쉬 수준에서 제공되기 때문에, 공포의 세부 부재 단위로 분할하거나 분석하는 데에는 한계가 존재한다. 한편, 최신 연구에서는 3차원 점군 데이터 상에서 상호작용형 분할(interactive segmentation) 기술이 발전하고 있다. 특히 AGILE3D[2]는 사용자 클릭 기반의 공간-시간 질의(click-as-query)와 주의(attention) 메커니즘을 활용하여 다중 객체를 동시에 분할할 수 있는 모델로, 최소한의 사용자 입력만으로도 정밀하고 효율적인 다중 객체 분할이 가능함을 보였다. 이는 문화재 복원 분야에 적용할 경우, 복원된 공포 점군을 세부 부재 단위로 자동 분할하여 구조적 해석과 후속 연구에 큰 도움을 줄 수 있다.

II. 본론

본 연구는 전통 목조 건축물의 핵심 구조 요소인 공포(栱包) 부재를 영상 기반으로 정밀하게 복원하고, 복원된 3차원 모델을 세부 부재 단위로 분할하기 위한 통합적 접근법을 제안한다. 전체 과정은 크게 3차원 복원 단계와 상호작용형 다중 객체 분할 단계로 구성된다.

먼저, 영상 기반 3차원 복원 단계에서는 공포 부재의 실제 건축물에서 다각도의 영상을 수집하였다. 촬영된 영상은 최소 12장에서 18장으로 구성되었으며, 다양한 시점에서 얻어진 입력 이미지를 통해 구조-모션(Structure-from-Motion, SfM) 알고리즘을 적용하였다. SfM은 영상 내 특징점을 추출하고 이를 서로 매칭하여 카메라의 위치와

자세를 계산한 후, 초기 희소 점군을 형성한다. 본 연구에서는 OpenMVG를 활용하여 이러한 과정이 수행되었으며, 생성된 희소 점군은 공포의 전체 윤곽을 반영하는 기초 데이터로 사용되었다. 이어서 다중 시점 스테레오(Multi-View Stereo, MVS) 기법을 적용하여 고밀도 점군을 재구성하였다. OpenMVS를 통해 복원된 점군은 텍스처 정보가 포함된 형태로 변환되었으며, 불필요한 배경 영역은 MeshLab을 사용해 제거하였다. 이 과정을 통해 공포 부재의 복잡한 형상이 정밀하게 복원되었고, 기존 사진만으로는 파악하기 어려운 내부 결구 방식이나 세부 조형 요소까지 재현할 수 있었다.

다음으로, 복원된 공포 점군을 세부 부재 단위로 분할하기 위하여 AGILE3D 기반의 상호작용형 다중 객체 분할 기법을 적용하였다. AGILE3D는 사용자 입력을 공간-시간 질의(spatial-temporal query)로 변환하고, 주의(attention) 메커니즘을 통해 점군 내 각 객체 간의 상호작용을 모델링한다. 사용자는 객체 대상물 클릭(positive click)과 배경 클릭(negative click)을 통해 원하는 부재를 지정하거나 불필요하게 포함된 영역을 배제할 수 있으며, 시스템은 이러한 입력을 고차원 쿼리 벡터로 변환하여 점군 특징과 상호작용시킨다. 이후 Query Fusion 모듈을 통해 각 클릭 기반 마스크가 통합되고, 전역적으로 일관된 세분화 결과가 산출된다. 이를 통해 공포의 주요 부재인 살미, 소로, 첨차 및 서까래 등의 건축물 부재요소가 독립적으로 추출되며, 경계가 명확하게 구분된 부재 단위 모델을 확보할 수 있다.

종합적으로 본 연구의 방법론은 영상 기반 SfM-MVS 기법을 통해 소수의 입력 영상만으로도 전통 목조 건축물 공포 부재의 정밀한 3차원 모델을 복원하고, AGILE3D 기반 상호작용형 분할 기법을 도입하여 복원된 점군을 부재 단위로 효율적으로 분할할 수 있음을 보여준다. 이러한 통합적 접근은 단순한 형태 재현을 넘어, 문화재 보존 및 학술 연구, 교육·전시 분야에서 활용 가능한 고품질의 디지털 데이터를 제공한다. 이는 점에서 의미가 있다.

III. 실험 결과

본 연구에서는 제안한 방법론의 유효성을 검증하기 위해 전통 목조 건축물의 부재를 대상으로 3차원 복원 및 분할 실험을 수행하였다. 실험은 크게 영상 기반 3차원 복원과 3D 다중 객체 분할 성능 검증으로 나누어 진행하였다.

우선, 3차원 복원 실험에서는 수덕사 대웅전, 봉정사 극락전 등 대표적인 전통 건축물의 공포 부재 영역들을 촬영하여 입력 영상으로 활용하였다. 각 건축물별로 약 12 ~ 18장의 영상을 사용하였으며, 이를 바탕으로 SfM 기법으로 최소 점군을 추출하고, MVS 기법으로 고밀도 점군을 생성하였다. 그림1 과 같이 결과적으로 복원된 공포 모델은 단순한 사진에서는 확인하기 어려운 구조적 세부 요소까지 정밀하게 재현할 수 있었다. 예를 들어, 곡선부의 결구 방식이나 내부 맞춤부와 같은 디테일이 3D 메쉬로 뚜렷하게 표현되었으며, 이는 공포의 전통적 건축 기법을 분석하는 데 중요한 근거를 제공하였다. 다만, 일부 단순한 평면 구조를 가진 사례에서는 특징점 추출이 불완전하여 벽체 인접 영역에 데이터 결손이 발생하는 한계도 확인 되었다.

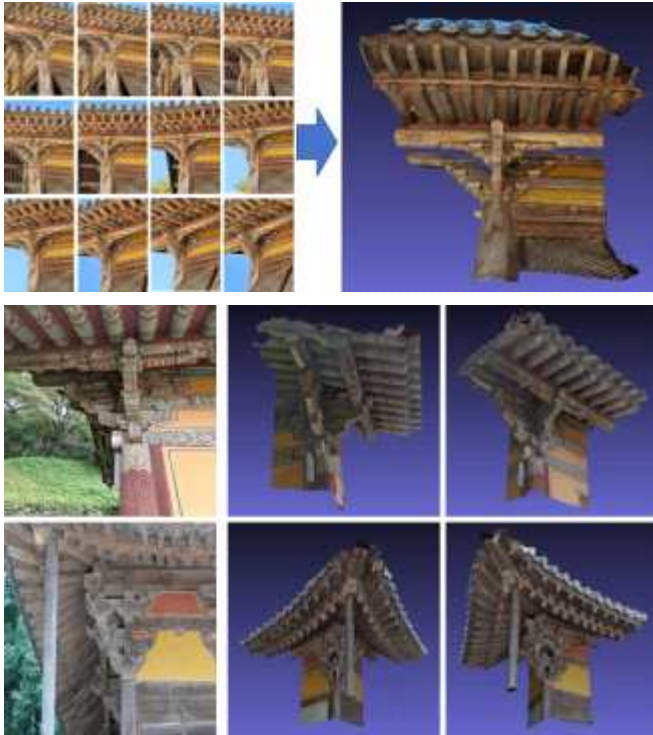


그림 1. 영상기반 공포 영역 3D 복원 결과

다음으로, 복원된 공포 점군을 대상으로 AGILE3D를 적용하여 상호작용형 다중 객체 분할 실험을 수행하였다. 사용자는 대상물 클릭(positive click)과 배경 클릭(negative click)을 통해 살미, 소로 등 공포의 주요 부재 및 기둥, 서까래 요소들을 지정하였으며, 시스템은 이를 기반으로 점군을 각 영역 단위로 분할하는 결과를 보였다. 그림 2. 에서 녹색의 서까래 분할 결과, 파란색의 살미 분할 결과, 그리고 갈색의 기둥 분할 결과를 보여주고 있다. 다만, AGILE3D 모델은 의자, 책상 등의 실내 대상물들에 대한 학습으로 설계된 3D 분할 모델로 부재 요소들에 대한 정확한 분할은 아직 부족한 결과를 보였다.

최종적으로, 본 연구의 실험 결과는 제안된 통합 파이프라인이 (1) 소수의 영상만으로도 공포 부재의 정밀한 3차원 복원이 가능함을 입증하고, (2) 복원된 점군을 AGILE3D 기반으로 세부 부재 단위까지 자동 분할할 수 있음을 보여주었다. 이러한 성과는 전통 목조 건축물의 구조적 이해와 디지털 보존을 위한 실질적 도구로서 본 방법이 활용될 수 있음을 확인시켜 준다.

IV. 결론

본 연구에서는 전통 목조 건축물의 핵심 구조 요소인 공포의 주요 부재 및 기둥, 서까래 요소 등을 대상으로 영상 기반 3D 복원과 최신

상호작용형 다중 객체 분할 기법을 결합한 새로운 접근법을 제안하였다. 우선, 소수의 영상만으로도 SfM과 MVS 기법을 통해 공포의 정밀한 3차원 모델을 재현할 수 있음을 실험적으로 확인하였다. 이를 통해 단순 2차원 영상만으로는 파악하기 어려운 결구 방식이나 세부 조형 요소를 시각적으로 명확히 분석할 수 있었다. 이어서, 복원된 점군 데이터에 AGILE3D 기반의 상호작용형 분할 기법을 적용함으로써, 살미·소로·침차등 공포의 세부 부재 및 기둥, 서까래등을 효과적으로 분할하였다. 그 결과, 사용자의 최소한의 입력으로도 높은 정확도의 분할이 가능했으며, 복잡한 부재 간의 경계도 명확히 구분되는 성과를 얻을 수 있었다. 향후, 공포부 및 구성요소들에 대한 학습 데이터 구축후 분할 모델의 재학습등을 통해 더 정확한 세부 분할기능을 제공할 것으로 기대한다

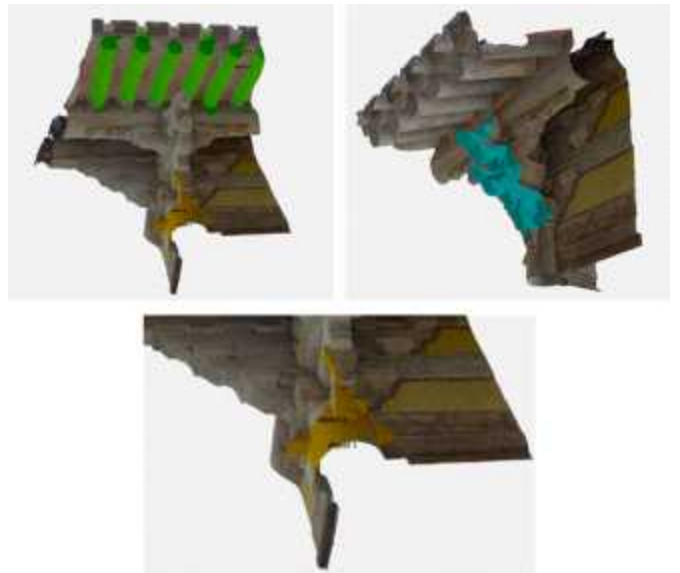


그림 2. 3D 복원 대상물(서까래, 살미, 기둥)의 분할 결과

ACKNOWLEDGMENT

이 연구는 국가유산청 및 국립문화유산연구원의 2024년도 ‘문화 유산 스마트보존, 활용 기술 개발 사업’으로 수행되었음(과제명: AI 기반 전통 목조 건축물 목구조 분석 및 가상 설계 기술 개발, 과제번호: RS-2024-00396158 기여율 100%)

참 고 문 헌

- [1] Jong Gook Ko; Seung Jae Lee" Few images based 3D Reconstruction of Korean Wooden Architecture Bracketing System(Gongfo)" 14th International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC), 2023.
- [2] Yuanwen Yue, Sabarinath Mahadevan "AGILE3D: Attention Guided Interactive Multi-object 3D Segmentation," 2024, (<https://arxiv.org/abs/2306.00977>).
- [3] Lei Gao, Yingbao Zhao, Jingchang Han and Huixian Liu " Research on Multi-View 3D Reconstruction Technology Based on SFM. <https://doi.org/10.3390/s22124366>, 2022
- [4] Khalil, M.; Ismanto, I.; Fu'ad, M.N. 3D reconstruction using structure from motion (SfM) algorithm and multi view stereo (MVS) based on computer vision. IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. 2021.