
문화 및 자연 유산의 해석을 위한 3차원 스캔 모델의 가시화

- 공룡발자국의 기록과 해석 사례

Visualization of 3D Scanned Model for Interpretation of Heritage - Case of Dinosaur Tracks for Documentation and Interpretation

안재홍, Jaehong Ahn*, 공달용, Dal-Yong Kong**, 원광연, Kwang-Yun Wohn***

요약 문화·자연유산 분야에서 3차원 스캐닝 기술은 아직 기록과 보존, 모니터링의 도구로 활용 폭이 제한되어 있으며, 전문가들에 의해 직접 활용되지 못하고 있다. 스캔 데이터의 정밀한 기하 정보는 효과적인 가시화를 통해 전문가들의 과학적 해석을 가능하게 할 수 있다. 본 연구에서는 이를 위해 스캔 모델로부터 필요한 기하 특성을 가시화하는 렌더링 기법들을 분석하고, 스캔 데이터의 가시화 파이프라인과 렌더링 기법 및 이의 분류 체계를 제시하였다. 또한 사례연구로서, 공룡발자국 분야의 기존 연구 방법을 분석하여 문제점을 도출하고, 이에 따라 스캔 모델을 가시화하여 전문가를 대상으로 테스트를 수행하였으며 이를 통해 효과성을 확인하였다. 본 연구는 3차원 스캔 데이터를 이용하여 문화 및 자연유산을 효과적으로 해석할 수 있는 실용적 방안을 제시하였음에 의의가 있다.

Abstract As yet the use of 3D scanning technology has been limited to documentation, preservation and monitoring in cultural and natural heritage domain. Appropriate visualization of precise geometric information in scan data can support scientific interpretation of the domain experts. We studied the rendering techniques which visualize the required features from scanned models, and proposed a 3D scan data visualization pipeline, rendering methods, and a classification scheme. As a case study, we analyzed the traditional method in the study of dinosaur tracks and performed the visualization of 3D scanned models. A user test based on the result confirmed an effectiveness of the proposed method. This research showed a practical method in which 3D scanned models can be used to effective interpretation of heritage.

핵심어: 3D Scan, Dinosaur tracks, Heritage, Rendering, Visualization

본 논문의 연구 중 일부는 문화재청 국립문화재연구소의 「천연기념물 공룡발자국 3D 기록화 사업」(2008-2010) 연구비 지원에 의해 수행되었음.

*주저자 : KAIST 문화기술대학원 박사과정; e-mail: jaehong.ahn@gmail.com

**공동저자 : 문화재청 국립문화재연구소 학예연구사

***공동저자 : KAIST 문화기술대학원 교수

■ 접수일 : 2013년 2월 7일 / 심사일 : 2013년 3월 3일 / 게재확정일 : 2013년 4월 18일

1. 서론

3차원 스캐닝 기술은 정밀성, 신속성, 편의성의 장점을 바탕으로 여러 산업 분야에서 활용되고 있으며, 문화 및 자연 유산 분야에서도 기록과 보존의 방안으로 주목을 받고 있다. 이는 그림 1과 같은 과정을 통해 과학적 분석과 표현, 그리고 이에 기반을 둔 해석 및 기록을 가능하게 하고 있다. 그러나 기술적으로 숙련된 전문가가 아니면 스캔 데이터를 다루기 어렵고 해당 분야에 특화된 소프트웨어나 연구개발이 부족하여 활용 폭을 넓히기 어려운 상황이다.[1]

문화·자연유산 전문가들에게 유용한 기하 특성을 스캔데이터로부터 효과적으로 가시화하여 표현한 이미지는 보다 객관적이고 새로운 관점의 해석을 가능하게 한다. 본 논문에서는 이러한 3차원 스캔 모델 가시화에 적합한 여러 렌더링 기법들을 분석하고 이를 적용하는 체계적 방법을 제시하였다. 또한 자연유산인 공룡발자국의 사례 연구와 사용자 테스트를 수행하였다.

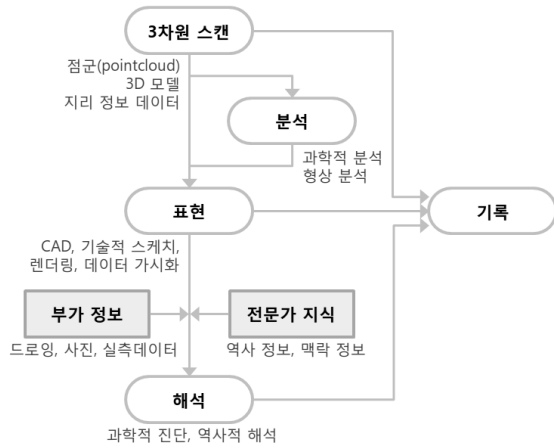


그림 1. 3차원 스캐닝에 기반을 둔 기록과 해석

2. 관련 연구

2.1 문화·자연 유산의 3차원 스캔

3차원 스캐닝 기술은 정밀한 데이터 구축, 정확한 치수 측정과 정량적 분석 가능성, 도면 제작을 위한 정사영상(正射映像) 제작의 용이성, 디지털 데이터 활용 등의 장점을 지니고 있다. 이에 국내외에서 정부 및 연구 기관이 중심이 되어 유물, 유적지, 발굴지 등 광범위한 영역에서 3차원 스캔 프로젝트를 수행해 오고 있다.[2-7] 주로 3차원 기록을 위한 용도로 사용되며, 가상복원과 같은 재현, 변형 모니터링 용도로도 사용되고 있다. 최근에는 GPS, 항공 라이다(Lidar), 광대역 스캐너, 정밀 스캐너, 사진 측량방식을 복합적으로 사용하기도 한다.[6,7]

자연유산의 3차원 스캔은 아직 활용도가 낮은 편이다. 해외의 관련 연구로는 동굴 내부 형상 기록[8], 빙하나 암석의 모니터링[9,10], 그리고 공룡의 뼈나 발자국의 기록·분석 프로젝트

등이 있다.[11-15] 문화재청 국립문화재연구소에서는 「천연기념물 공룡발자국 3D 기록화 사업」을 통해 주요 화석산지에 대한 기록과 분석을 수행하였다.[16-19].

2.2 렌더링에 의한 3차원 모델 가시화

3차원 모델을 렌더링하여 가시화하는 방안으로는, 사실적 렌더링(Photorealistic Rendering)을 통해 직관적으로 인식할 수 있도록 하거나, 비사실적 렌더링(Non-Photorealistic Rendering) 기법을 써서 대상의 국지 형상(Local shape)과 같은 특정한 기하 특성을 드러내는 방법이 있다.

대상의 특징적인 윤곽을 선으로 표현하는 선화(線畵)를 구현하기 위한 비사실적 렌더링 방법으로는, ridges and valleys[20], suggestive contours[21], apparent ridges[22], demarcating curves[23], laplacian lines[24] 등의 방법이 있다. 표면의 요철이나 형상의 윤곽을 명확하게 드러내기 위한 방법으로는, 표면의 각 지점에서의 접근성(Accessibility)에 따라 음영을 표현하는 accessibility shading[25], ambient occlusion[26]이 있다. 또한 표면의 요철이 강조되도록 렌더링하여 세부 형상 특징을 드러내기 위해, 표면 각 부분에 서로 다른 동적인 광원을 적용하는 exaggerated shading[27], 국지적으로 광패턴을 변형하여 표면 특성을 표현하는 light warping[28] 등의 방법이 있다.

3. 3차원 스캔 데이터의 가시화

3.1 3차원 스캔 데이터 가시화 과정

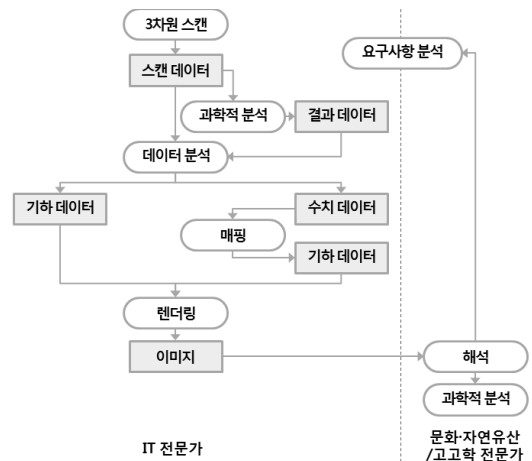


그림 2. 3차원 스캔 데이터 가시화 파이프라인

문화·자연유산 분야에서의 3차원 스캔 데이터 가시화 파이프라인(Pipeline)은 그림 2와 같이 나타낼 수 있다. 일반적으로 IT전문가와 문화·자연유산 전문가 간의 협업으로 이루어지는데, 각 단계를 수행하기 전 최종 결과를 해석하는 문화·자연유

산 전문가의 요구사항을 체계적인 조사 방법을 통해 도출하고, 기존 방법의 문제점이나 3차원 스캔 데이터의 과학적 분석 가능성을 파악해야 한다. 3차원 스캐너로 취득한 데이터는 직접 분석되거나 결과 데이터를 생성할 수 있다. 기하 데이터는 렌더링되어 이미지로 만들어지며, 수치 데이터의 경우 3차원 모델이나 도형요소에 매핑되어 기하 데이터 형태로 렌더링 된다. 이 과정에서 활용 목적과 해석 조건에 적합한 형태로 가시화할 수 있는 렌더링 기법이 결정되어야 한다.

3.2 문화·자연유산 3차원 모델 가시화의 필요성

3차원 스캐닝 데이터는 정보를 추출하고 가공하여 전통적인 연구에서 직접 활용될 수 있다. 기하정보를 도면, 등고선 혹은 렌더링 이미지로 직접 나타내거나, 변위 측정이나 과학적 실험 결과 데이터를 모델에 매핑하기도 한다. 특히 적절한 가시화 이미지는 전문가들에 의해 효과적으로 해석될 수 있는 기반이 된다. 이 때 가시화 이미지는 단순히 정보를 표현하는 용도를 넘어 해석과 과학적 분석의 도구로 기능한다.

3.3 3차원 모델 가시화를 위한 렌더링 기법의 분류

3차원 스캔 모델을 시각적으로 표현하는 렌더링은 사실적 렌더링과 비사실적 렌더링으로 구분된다. 사실적 렌더링은 형태와 질감, 음영을 현실적으로 표현하여 대상의 인지에 있어 직관성을 높인다. 비사실적 렌더링은 예술적 표현 기법을 구현하여 미적인 효과를 내거나 특정한 형태적 특성을 드러낸다. 이를 바탕으로 렌더링을 표현 특성에 따라 사실 기반과 특성 기반으로 나눌 수 있다. 또한 대상의 전체적인 3차원 형상의 양감을 표현하는가, 혹은 표면의 국지적인 형상 특성을 드러내는가에 따라 구분해 볼 수 있다. 이에 따라 3차원 모델의 가시화를 위한 렌더링 기법 분류체계를 '사실 기반-특성 기반', '전체 형상-국지 형상'의 두 축으로 나누어 그림 3에 나타내었다.



그림 3. 3차원 모델 가시화를 위한 렌더링의 분류체계

관련 연구 상의 렌더링 기법의 기술적 특성과 시각적 특성을 정리하고(표 1), 이를 바탕으로 분류 체계의 두 축 상에 배치하였다(그림 4). 각 기법은 설정값에 따라 결과가 달라지기 때문에 영역으로 위치하고 점선으로 표시하였다. 영역의 위치는 기

법 간의 상대적인 특성을 고려하였다.

표 1. 각 렌더링 기법의 특성

	결과	기술적 특성	분류
LD		특징 형상에 기반을 두고 외곽선과 국지적인 선을 그림. 여러 알고리즘 가능.	특성 기반으로 전체와 국지 형상 표현.
AO		광원 없이 국지적 형상과 전체적인 양감을 표현. AC와 결과 유사함.	형상특성 기반으로 음영 생성. 전체, 국지 표현.
ES		요철을 과장 표현. 파라미터를 조정하여 표현 레벨 변경 가능.	사실 기반으로 요철을 강조하여 국지형상 표현.
LW		국지적으로 광패턴을 변형하여 표면 특성을 표현.	사실 기반으로 국지 형상 표현.
MC		곡면의 평균 곡률 맵을 매핑함으로써 국지적인 형상을 표현.	특성 표현이 강함. 곡률에 따라 전체, 국지 형상 표현.
PH		표면의 법선 값 정보와 표면의 속성, 조명을 이용하여 계산.	사실적인 표현. 국지 형상을 별도 표현하지는 않음.
RT		광원에서 나온 빛을 추적하여 화소의 컬러 계산. 사실적 표현 가능.	사실적인 표현. 국지 형상을 별도 표현하지는 않음.

LD: Line drawing; AO: Ambient occlusion; AC: Accessibility shading; ES: Exaggerated shading; LW: Light warping
MC: Mean curvature; PH: Phong shading; RT: Raytracing

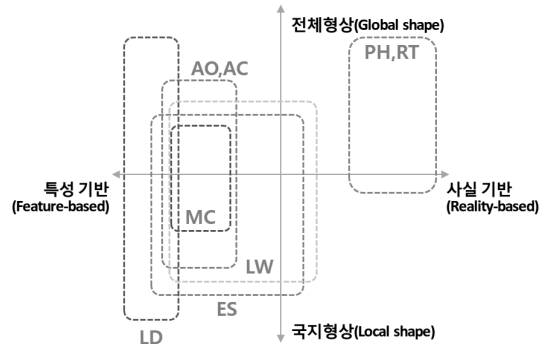


그림 4. 렌더링 기법의 분류

가시화의 목적에 따라 분류된 것과 같이 렌더링 특성을 결정하고 이에 적합한 렌더링 기법을 선택할 수 있다.

4. 자연유산 3차원 스캔 가시화 사례- 공룡발자국

KAIST 문화기술대학원은 문화재청 국립문화재연구소의 「천연기념물 공룡발자국 3D 기록화 사업」에 2008년(2차), 2009년(3차) 및 2010년(4차) 참여하였다. 본 장에서는 사업 수행 과정에서의 경험과 데이터를 바탕으로 3차원 스캔과 이의 가시화 과정에 대해 논의하도록 한다.

4.1 천연기념물 공룡발자국 3D 기록화 사업

4.1.1 사업 목적

사업 목적은 한번 훼손되거나 멸실되면 복원이 불가능한 공룡발자국 화석산지를 3차원 디지털 기술로 기록하여 원형을 보존하고, 분석에 필요한 기초정보를 정확히 획득하는 방법으로 3D 스캐닝 기법을 검토하고 이를 연구에 활용하는 것이다.

4.1.2 수행 방법

넓은 화석산지를 스캔하기 위해 비행시간측정(Time-of-Flight) 방식의 광대역(廣帶域)스캐너와 개별 발자국들을 정밀하게 스캔하기 위해 삼각측량(Triangulation) 방식의 근거리 정밀 스캐너를 사용하였다. 화석산지 전체와 개별 발자국을 각기 다른 해상도로 스캔하고 이를 병합하여 다중해상도(Multi-resolution) 스캔 데이터를 생성하였다.

4.1.3 성과 및 의의

화석산지와 발자국에 대한 디지털 기록을 구축하는 한편, 여러 형태의 2차 산출물을 생산하여 데이터의 활용을 시도하였다. 각 화석산지 별로 스캔데이터를 비롯해 이로부터 생성한 메쉬모델, 도면, 배치도, VR모델 등을 구축하였다.

각 결과물 산출 시 고생물학 전문가에게 자문을 하였으며 이 과정을 통해 발자국의 기록과 분석에 있어 기존 방법이 가진 문제점을 3차원 스캐닝이 보완할 수 있는 가능성을 확인하였다. 특히 스캔데이터의 분석과 가시화는 배치도나 해석적 드로잉 작성, 치수 측정과 같은 전통적인 방식의 연구에 직접적으로 크게 도움이 되었다고 평가되었다.

4.2 공룡발자국 가시화 과정

본 절에서는 자연유산 3차원 스캔 모델의 가시화 사례로, 기존 공룡발자국 연구 방법의 문제점을 고찰하고 3차원 스캔에의 요구사항과 활용 목적을 분석하여 이에 따라 3차원 모델의 가시화를 수행하는 과정을 다룬다. 3장의 「천연기념물 공룡발자국 3D 기록화 사업」수행 경험과 당시 획득한 데이터를 바탕으로 하였으며, 요구사항 및 문제점의 심화 분석을 위한 설문과 조사를 실시하고 분석에 의거한 가시화 결과에 대해 평가를 수행하였다. 5장과 6장에서 이에 대한 구체적인 내용을 다루었다.

4.2.1 기존 연구방법 고찰

고생물 전문가가 발자국을 현장에서 기록하고 해석하는 과정은 일반적으로 그림 5와 같은 단계를 거쳐 이루어진다. 화석산지 현장에서 공룡발자국의 형상을 시각적으로 인지한 후, 깊이 가 매우 얇거나 잘 드러나지 않는 경우 손으로 형상을 확인한다. 현장에서는 투명필름 상에 직접 드로잉하거나 사진으로

기록, 혹은 실리콘으로 캐스팅(Casting)하고, 수작업으로 실측하는 것이 일반적이다.

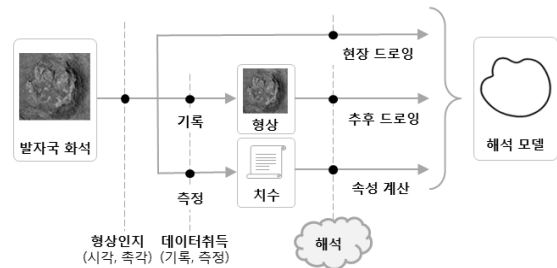


그림 5. 발자국 화석 해석 과정의 단계

해석 모델은 기록된 영상과 치수에 전문가의 해석이 더해져 구축되는 결과적 모델로서, 현장 작업이나 후반작업을 통해 작성되는 해석적 드로잉(Interpretative drawing; 그림 6)과 같은 시각적 모델, 혹은 측정 치수를 바탕으로 계산된 발자국의 여러 정량적 속성 모델을 포함한다. 드로잉이나 측정 작업에서는 이를 수행하는 전문가의 해석과 이에 따른 결정이 중요한 역할을 하는데, 해석은 전문가의 주관적 판단에 따라 이뤄지는 부분이 많다. Thulborn은 이에 대해 다음과 같이 기술하고 있다.[29] “발자국의 드로잉은 의구심을 가지고 봐야 한다. 이는 복잡한 3차원 대상물에 대한 한 사람의 해석을 나타내며, 이는 다른 사람의 해석과는 다를 수 있다.”

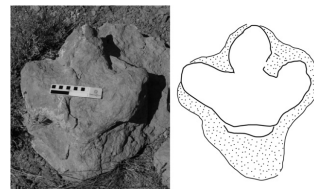


그림 6. 해석적 드로잉의 예

4.2.2 단계별 문제점

공룡발자국을 확인하고 해석하는 과정의 각 단계는 시각적인 인지와 관련하여 다음과 같은 문제점들이 파악되었다.

• 형상 인지 단계

- (1) 빛에 따른 시각적 모호함(Visual ambiguity): 인간의 시각 시스템은 이미지를 인식할 때 하나의 광원이 위쪽 방향에서 온다고 가정(Light-from-above)하는 경향이 있는데[30], 광원이 아래쪽에 있거나 확산광일 경우 모호함이 발생할 수 있다. 그림 7과 같이 광원 위치에 따라 발자국의 형상이 다르게 보일 수 있다. 사진으로 기록 시 태양광이 사면으로 비추는 때가 추천되지만 이를 항상 만족하기는 어렵다. 하이라이트나 그림자에 의해 일부가 가려지기도 한다.

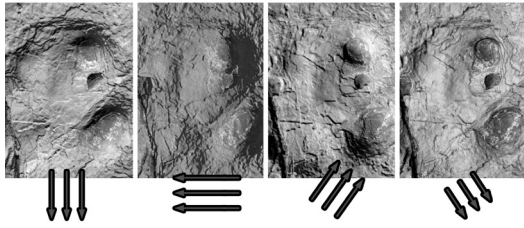


그림 7. 광원 위치에 따라 다르게 보이는 발자국

- (2) 텍스처에 의한 인지의 어려움: 발자국 화석이 불균일하고 복잡한 텍스처를 가지고 있는 경우, 사진 상으로 형상이나 상대적인 깊이를 인지하기 어려울 수 있다.

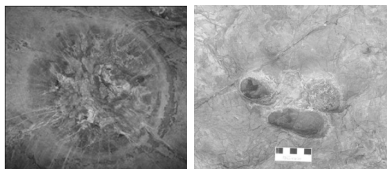


그림 8. 표면 텍스처에 의한 시각적 모호함

• 기록 단계

- (3) 부정확한 측정: 주관적으로 결정하는 측정 기준, 기준면이 부정확한 깊이 측정 등으로 인해 정확도가 떨어진다.
- (4) 기록 과정에서의 왜곡: 사진 촬영 시, 정각 촬영의 어려움과 사진의 왜곡이 발생하며, 보행렬과 같은 넓은 지역 촬영 시 왜곡은 더 커진다.
- (5) 정보의 유실(遺失): 드로잉은 종종 지나친 단순화로 인해 3차원 정보, 세부 형상 등 많은 정보를 잃게 된다.
- (6) 기록의 어려움: 3차원 정보 추출을 위해 캐스트를 이용하나, 이는 화석 훼손의 우려가 있고 배포·공유에 한계가 있다. 넓은 영역에 걸친 보행렬의 경우, 캐스트는 무게, 보관의 문제가 있고, 드로잉 작업 역시 매우 어렵다.
- (7) 부조 모호함(Bas-relief ambiguity): Lambertian 반사를 갖는 물체를 수직으로 보면 3차원 형상 인지에 모호함이 발생하며, 특정 방식으로 형태가 변형된 모델과 원형의 조명 이미지가 동일한 경우가 발생한다.[31] 그림 9에서 발자국 내부 형태가 달라도 광원 위치에 따라 이미지는 거의 동일하게 보인다. 이는 사진이나 렌더링 이미지에서의 모호함 발생 가능성을 보여 준다.

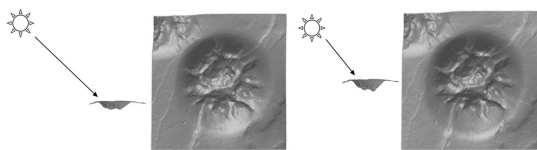


그림 9. 공룡발자국에서의 부조 모호함

• 해석 단계

- (8) 주관적 해석: 공룡발자국 화석으로부터 발자국의 경계와 같은 세부 형상이나 측정 기준을 결정하는 것은 주관적인 해석과 판단에 따르게 된다. 일반적으로 발자국의 주요 수치를 측정할 때 측정 기준 지점을 결정하는데 어려움이 있다. 발자국의 형태, 퇴적물의 입도, 수분 함량 등 여러 요인에 따라 상황이 달라질 수도 있다. Thulborn은 이에 대한 어려움과 주관성의 문제를 지적한 바 있다.[29]

위와 같은 문제점들은 최종 해석 결과의 신뢰도와 객관성을 떨어뜨리게 되며, 이는 선행 연구 결과를 바탕으로 한 후속 연구의 품질에도 영향을 미치게 된다.

4.2.3 가시화 결과

3차원 스캔에 의해 구축된 공룡발자국 3차원 모델에 대한 가시화의 목적으로, 기존 연구방법의 문제점 고찰과 기대효과 분석(5, 6장 참고), 기 수행과제 경험을 바탕으로 (1) 객관적 표현 (2) 화석 상태 기록 (3) 깊이 정보 가시화 (4) 해석적 드로잉의 바탕 등 네 가지 가시화 목적을 설정하였다. 각 가시화 방안은 그 목적의 특성과 요구사항에 따라 앞서 제시한 분류 체계 위에 그림 10과 같이 나타낼 수 있다.

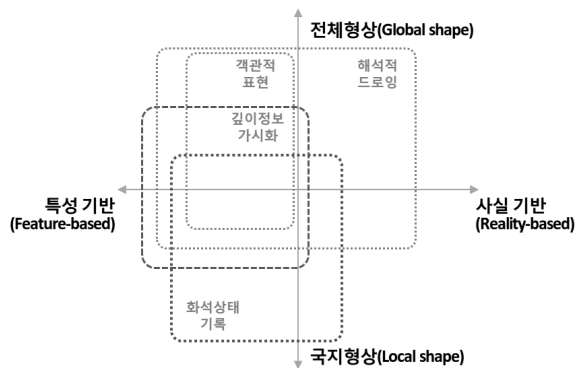


그림 10. 목적에 따른 가시화 방안 분류

각 가시화 목적이 분류 체계 상에 놓여진 위치에 따라, 해당 위치에 포함되거나 근접한 렌더링 기법(그림 4)을 선택하여 목적에 부합하는 가시화 이미지를 생성할 수 있다.

- (1) 객관적 표현: 조명과 무관하게 가시화하여 형상 인지를 객관적이고 명확하게 하고, 측정과 해석을 용이하게 하기 위해 ambient occlusion을 적용하였다(그림 11). Phong shading은 작업자의 광원 설정에 따라 다른 결과가 나오며, 광원 위치와 각도에 따라 하이라이트 혹은 그림자에 의해 세부 형상이 잘 표현되지 않거나 곡률이 다르게 보일 수 있다. 반면 ambient occlusion은 광원과 무관하게 형상에 의해 음영이 생성되어 객관적으로 형상을 나타낼 수 있다. 한 지점의 음영은 주변 형상에 의해 결

정되어, 솟은 부분(ridge)는 밝고 계곡 부분(valley)은 어둡게 나타난다(그림 12).

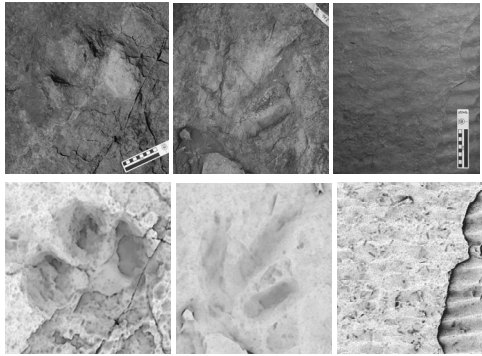


그림 11. Ambient occlusion으로 가시화한 결과 (왼쪽부터 조각류, 수각류, 새 발자국; 위:사진, 아래:렌더링이미지)

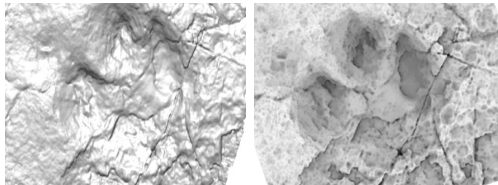


그림 12. Phong shading(왼쪽)과 ambient occlusion(오른쪽)

(2) 화석 상태 기록: 화석의 현상(現象)을 기록하기 위해 표면의 균열을 선명하게 나타내고자 하는 경우, 얇거나 작은 틈새를 과장하여 강조할 수 있는 비사실적 렌더링 기법인 exaggerated shading, mean curvature, light warping 등을 사용할 수 있다. 그림 13은 exaggerated shading으로 발자국 화석 표면의 균열을 강조한 것이다.

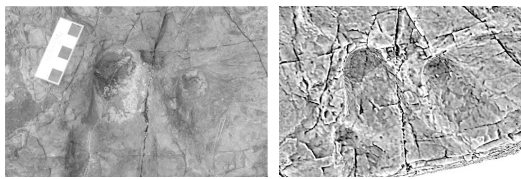


그림 13. 화석 균열 가시화

(3) 깊이 정보 가시화: 깊이 정보는 공룡의 이동(Locomotion) 분석에 중요하다. 3차원 모델로부터 등고선이나 컬러램프(Color ramp) 이미지를 생성해서 깊이의 분포를 나타낼 수 있다.

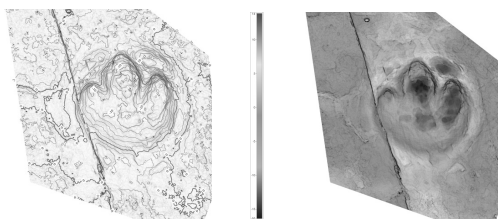


그림 14. 등고선(왼쪽)과 컬러램프(오른쪽)

(4) 해석적 드로잉의 바탕: 드로잉의 바탕으로 제공하기 위한 이미지에서는 발자국의 정확한 인지와 해석을 위해 전체 형상과 국지적 세부 형상을 모두 명확하게 드러낼 필요가 있다. 이를 위해 사실적 렌더링 이미지와 비사실적 렌더링 이미지를 합성하거나 함께 제공할 수 있다. Ambient occlusion은 형상을 객관적으로 표현하여 드로잉의 바탕으로서 장점을 가진다. 다만 음영의 강도가 깊이와는 무관하여, 일반적으로 어두운 부분이 깊다고 인식하는 경향인 dark-means-deep 모델[32]과 달라 내부 지점들의 상대적 깊이 비교가 어려울 수 있다. 등고선이나 컬러램프와 합성하여 깊이 정보를 줄 수 있다.

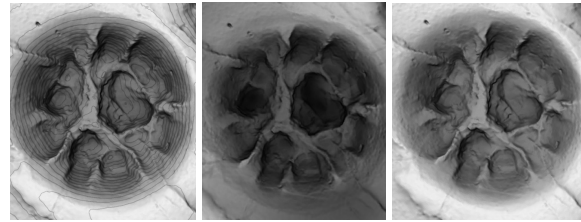


그림 15. 렌더링 이미지의 합성 (왼쪽부터 PH+AO+등고선, PH+AO+컬러램프, PH+AO; PH: Phong, AO: Ambient Occlusion)

보행렬의 경우, 발자국의 위치와 형상을 동시에 나타낼 필요가 있다. 이를 위해 보행렬 전체를 포함하는 광대역 스캔 모델과 발자국 정밀 스캔 모델이 정합된 다중 해상도 모델을 만들고, 이를 지면에 수직한 정사영상으로 렌더링하여 가시화함으로써 전체 보행렬과 개별 발자국을 함께 나타낸다(그림 16).

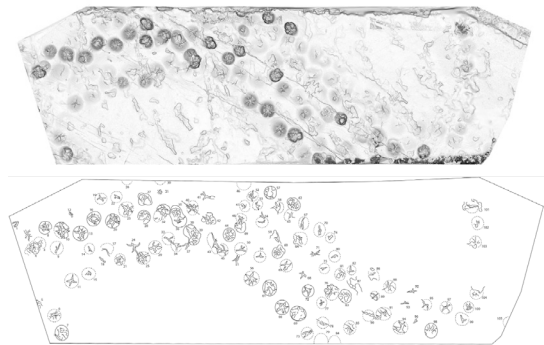


그림 16. 다중 해상도 모델의 ambient occlusion 이미지와 이를 바탕으로 한 배치도

5. 실험

공룡 발자국 연구 분야에 종사하며 현장 경험이 있는 4명의 현직 전문가들을 대상으로, 해석과정의 문제점에 대한 설문과 드로잉 실험을 수행하였다. 피험자들은 3차원 스캐닝에 대해 알고 있었으며, 직접 활용해 본 사람은 1명이었다.

5.1 설문

발자국을 인지하고 해석하는 과정에서 발생 가능한 문제에 대해 5점 척도의 설문을 수행하였다(표 2). 각 항목은 기록화 과제 수행과정에서의 경험, 전문가 작업과정 관찰, 그리고 인터뷰를 통해 도출되었다. 공룡발자국 연구에의 3차원 스캐닝 기술 도입에 의한 기대 효과에 대한 설문도 수행하였다(표 3). 이는 3차원 스캔 모델 가시화의 목적을 도출하는데 활용되었다.

표 2. 설문 1

번호	문제점
1	육안으로 화석에서 형상을 시각적으로 인지하기 어렵다.
2	세밀한 형상(균열, 피부화석, 새발자국)을 인지하기 어렵다.
3	날씨, 조명에 따라 발자국의 세부 형상이 다르게 보인다.
4	정확하고 객관적인 치수(길이, 각도) 측정이 어렵다.
5	육안으로 깊이 분포를 정확하게 인지하기가 어렵다.
6	발자국의 형상 도출 시 주관적인 판단이 많이 들어간다.
7	사진으로 확인 시, 정확한 형상을 인지하기 어렵다.
8	발의 형상 드로잉 시 명확한 기준이 없다.
9	드로잉 시 지나친 간략화로 인해 정보 손실이 발생한다.
10	넓은 보행렬 도면 작성 시 정밀도가 많이 떨어진다.
11	사진 촬영 시 왜곡이 발생한다.

표 3. 설문 2

번호	기대효과
1	정밀한 치수(길이, 각도, 깊이) 측정
2	배치도 작성의 정확성과 용이성
3	유용한 정보(등고, 용적, 단면 등) 추출
4	발자국 형상의 명확한 가시화
5	디지털 기록을 통한 형상 보존
6	화석지의 훼손 진행정도 모니터링
7	데이터 공유를 통한 원격 연구
8	데이터의 다목적 활용(원소스멀티유즈)

5.2 드로잉 테스트

형상 특징을 가시화하여 이를 드로잉의 바탕으로 활용하는 것이 현장에서의 드로잉보다 효과적이며 해석에 있어 형상 인지와 객관성 확보에 도움이 되는가를 보기 위해 드로잉 테스트를 수행하였다. 동일한 발자국에 대해 다른 형식의 이미지를 제공하고, 일반적으로 현장에서 발자국을 드로잉하는 방식처럼 이미지 위에 투명 필름을 대고 그리도록 하였다(그림 17). 조각류와 수각류 발자국 3개를 대상으로, 각각 사진, 사실적 렌더링(Phong shading), 비사실적 렌더링(Ambient occlusion) 이미지를 제공하였다. 각 단계에서는 앞서 사용한 이미지의 정보를 기억하여 활용하지 않고 주어진 이미지만을 활용하도록 상기시켰다. 테스트 후에는 설문을 수행하였다.



그림 17. 드로잉 테스트 장면

6. 결과 및 토의

6.1 설문

발자국 화석을 인지하고 해석하는 과정에 발생할 수 있는 문제점에 대해 피험자들은 모든 항목에 대해 '보통이다' 이상으로 동의(평균 4.0)하였다. 특히 1, 3, 6번 항목에 대한 동의가 높았으며, 이는 발자국 형상의 시각적 인지가 어려우며 해석에 주관이 많이 개입됨을 의미한다. 공룡발자국 연구에 3차원 스캐닝 기술 도입의 기대 효과에 대해서는 모든 항목에 높은 동의(평균 4.69)를 보였는데, 피험자들이 3차원 스캐닝 기술의 연구 활용 사례를 알고 있어서 기대가 큰 것으로 보인다.

6.2 드로잉 테스트

드로잉 테스트 결과 중 각 발자국별로 2가지를 발췌하여 그림 18에 나타내었다. 발자국 1의 경우, 사진에서는 우측 발가락이 거의 보이지 않으나, 렌더링 이미지에서는 윤곽이 잘 드러났다. 사실적 렌더링에서는 하이라이트에 의해 외곽선이 흐려져 있으나, 비사실적 렌더링에서는 외곽선은 물론 발가락 끝의 깊은 골까지 선명하게 나타났다. 이는 드로잉에도 반영이 되었으며, 피험자들도 그러한 점이 인식과 드로잉에 영향을 주었다고 하였다. 사진을 바탕으로 한 첫 번째 드로잉에서는 내부 색상이 주는 정보를 바탕으로 보조선을 그렸으나, 비사실적 렌더링에서는 형상 변화에 따른 음영을 바탕으로 하여 그렸다. 이는 비사실적 렌더링이 형상을 보다 정확히 표현함으로써 결과적으로 드로잉의 목적을 충실하게 수행할 수 있게 한 것이라 볼 수 있다. 발자국 2에서는 사진에서는 잘 보이지 않는 아래의 외곽선과 내부의 형상이 렌더링에서 드러남으로써 드로잉에 반영이 된 것을 볼 수 있다. 발자국 3은 매우 얇은 발자국이어서 피험자들이 사진 상에서 드로잉 하는 것을 매우 어려워했다. 그러나 윤곽이 잘 드러난 렌더링 이미지에서는 어렵지 않게 드로잉 하는 것을 볼 수 있었다. 일반적으로 사진보다는 렌더링 이미지, 특히 비사실적 렌더링 이미지를 바탕으로 하였을 때 형상을 확실히 인지하고 세부 형태까지 표현할 수 있음을 확인하였다.

사실적 드로잉에서 발자국이 양각으로 보이기도 한다는 의견도 있었는데, 이는 시각적 모호함을 Phong shading이 보일 수 있기 때문이다. 2번 발자국에서 사실적 렌더링이 비사실적 렌더링보다 인식에 나았다는 답변도 있었는데, 이는 직관에 가까운 인식이 나은 경우도 있음을 나타내는 것이라 생각된다.

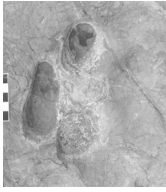
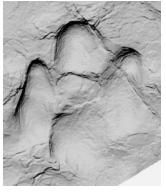
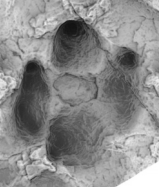



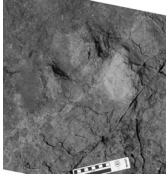
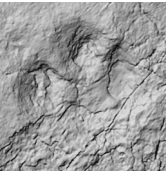
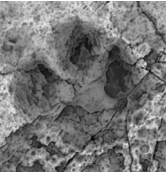









	사진	사실적 렌더링	비사실적 렌더링
1			
			
2			
			
3			
			

그림 18. 드로잉 테스트 결과

드로잉 후 실시한 설문에서는 모든 피험자들이 사진이 가장 비효과적이었으며, 대부분(12개 중 10개)의 경우 비사실적 렌더링이 가장 효과적이었다고 답하였다. 추가로 실제 화석에서 직접 드로잉 하는 것을 가정할 경우의 효과성을 질문하였다. 피험자들은 모두 현장에서의 드로잉 경험이 있는 전문가들이어서 이러한 질문이 유효하다고 판단하였다. 현장에서는 사진과 달리 입체감을 느낄 수 있고, 여러 각도에서 보고 손으로 만져 보며 부조 모호함이나 조명에 의한 시각적 모호함 등을 극복할 수 있다. 그러나 전체 12개의 경우 중 11개에서 렌더링이 직접 드로잉 하는 것보다 낫다는 답이 나왔으며 그 중 10개에서 비사실적 렌더링이 가장 효과적이라고 하였다. 이는 렌더링이 제공하는 객관성과 명확성이 육안으로 보는 경우보다 높다고 느낀 때문인 것으로 보인다.

렌더링 이미지의 효과가 높았던 이유로는, '발자국의 3차원적 형태를 명확하게 인지할 수 있었다'가 가장 점수가 높았으며, 다음으로는 '주관적 판단의 소지를 줄여 주었다', '육안으로 보기 어려운 세부 형상들이 잘 나타나 있었다', '형상을 직관적으로 인지할 수 있었다' 항목이 점수가 높았다. 사진이 비효율적이었던 이유로는, '주관적인 판단이 많이 필요했다', '작은 세부 형상들이 잘 나타나지 않았다'가 가장 점수가 높았고 '이미지가 주는 정보가 너무 적었다', '사실감이 떨어져 직관성이 낮았다'는 항목이 다음으로 점수가 높았다.

결과에서 보듯 사진보다는 비사실적 렌더링 이미지에서 형상을 쉽게 인식하고 상세한 드로잉을 하였다. 이는 목적에 맞는 효과적 가시화가 전문가들의 해석에 긍정적 효과를 주었음을 의미한다. 각 피험자 간 드로잉의 차이는 아직 드로잉의 기준이 명확하지 않고 해석 과정에 주관성이 개입됨을 보여주고 있다. 드로잉 시 어떤 형상 특성을 선으로 그리는 것이 좋은가를 객관적으로 결정하기는 어렵다.[33] 따라서 드로잉 과정에서 객관성을 확보하고 정보 유실을 최소화하도록 적합한 가시화 이미지를 제공하고, 이를 드로잉 결과와 함께 기록하는 것이 유용할 것이다.

7. 결론

본 연구에서는 문화-자연유산 분야에서 연구의 목적과 특성에 따른 3차원 스캔 모델의 가시화가 해당분야 전문가들의 객관적인 해석을 뒷받침함을 보이고자 하였다. 이를 위해 3차원 스캔 모델 가시화를 위한 렌더링 기법들을 표현 특성에 따라 분류하는 체계를 제안하였으며, 이를 바탕으로 여러 렌더링 기법을 분석하고 사용 목적에 적합한 가시화 방안을 도출하였다. 이를 공룡발자국에 대해 적용한 사례 연구에서, 기존 연구 방법의 문제점을 분석하고 적합한 렌더링 기법을 도출하여 가시화를 수행하였다. 그 결과를 바탕으로 전문가를 대상으로 한 실험을 통해 본 연구에서의 분석과 그 결과가 타당하였음을 확인하였다. 본 연구는 3차원 스캔 데이터를 활용하여 보다 객관적이

고 과학적으로 해석을 할 수 있는 방안에 대해 체계적으로 접근하였다. 또한 기존의 기록, 측정, 배포 방법이 가지고 있는 정보의 유실, 부정확성, 객관성 저하 등의 문제를 고찰하고, 이를 3차원 스캐닝과 가상화 기술로 보완할 수 있음을 보였다.

본 연구는 문화·자연유산 분야를 대상으로 하였으나 사례 연구에서는 공룡발자국만을 다루었다. 문화유산에 대해 동일한 과정을 적용할 수 있겠으나, 유적지, 발굴지와 같은 다양한 형태를 고려하지는 못하였다. 본 연구에서 제시한 방안에 의해 문화유산의 스캔 모델을 목적에 적합하게 가상화함으로써 부조, 조각, 명문(銘文) 등의 문화유산 혹은 화석과 같은 자연유산의 형상 해석과 기록에 도움을 줄 수 있다. 전문가들의 요구와 연구 기법 분석, 가상화 기법에 대한 조사와 실험을 더하여 3차원 스캔 모델의 가상화 과정과 이의 해석에 대한 실용적 가이드라인을 구축할 수 있을 것이다.

참고문헌

- [1] Artesea, G., Achillib, V., Boattob, G., Fabrisb, M., Salemib, G. and Trecrocia, A., Peter Bernini in Calabria: The Sculptures of the "Ss. Pietro E Paolo Church" in Morano Calabro. In Proc. of CIPA XX, Torino, Italy. pp. 91-94. 2005.
- [2] Levoy, M., Pulli, K., Curless, B., Rusinkiewicz, S., Koller, D., Pereira, L. and Fulk, D., The digital Michelangelo project: 3D scanning of large statues. In Proc. of the 27th annual conf. on Computer graphics and interactive techniques. New Orleans, USA. pp. 131-144. 2000.
- [3] Beraldin, J. A., Picard, M., El-Hakim, S. F., Godin, G., Valzano, V., Bandiera, A. and Latouche, D., Virtualizing a Byzantine crypt by combining high resolution textures with laser scanner 3D data. In Proc. of Int. Conf. on Virtual Systems and Multimedia, Gyeongju, Korea. pp. 3-14. 2002.
- [4] Guidi, G., Beraldin, J. A. and Atzeni, C., High accuracy 3D modeling of Cultural Heritage: the digitizing of Donatello's "Maddalena". IEEE Transactions on Image Processing. 13(3). IEEE Signal Processing Society. pp. 370-380. 2004.
- [5] Grün, A., Remondino, F. and Zhang, L., Photogrammetric reconstruction of the great Buddha of Bamiyan, Afghanistan. The Photogrammetric Record. 19. Remote Sensing and Photogrammetry Society. pp. 177-199. 2004.
- [6] El-Hakim, S., Beraldin, J. A., Remondino, F., Picard, M., Cournoyer, L. and Baltsavias, E., Using terrestrial laser scanning and digital images for the 3D modelling of the Erechteion, Acropolis of Athens. In Proc. of Conference on Digital Media and its Applications in Cultural Heritage. Amman, Jordan. pp. 3-16. 2008.
- [7] Guidi, G., Remondino, F., Russo, M., Menna, F., Rizzi, A. and Ercoli, S., A multi-resolution methodology for the 3D modeling of large and complex archeological areas. Int. Journal of Architectural Computing. 7(1). Architectural Computing. pp. 39-55. 2009.
- [8] Buchroithner, M. F. and Gaisecker, T., Terrestrial Laser Scanning for the Visualization of a Complex Dome in an Extreme Alpine Cave System. Photogrammetrie-Fernerkundung-Geoinformation. 2009(4). Schweizerbart Science Publishers. pp. 329-339. 2009.
- [9] Bauer, A., Paar, G. and Kaufmann, V., Terrestrial laser scanning for rock glacier monitoring. In Proc. of 8th Int. Conf. on Permafrost. Z rich, Switzerland. pp. 55-60. 2003.
- [10] Abellan, A., Vilaplana, J. M., Calvet, J., Garcia-Selles, D. and Asensio, E., Rockfall monitoring by terrestrial laser scanning-case study of the basaltic rock face at Castellfollit de la Roca (Catalonia, Spain). Natural Hazards and Earth System Science. 11(3). Copernicus publications. pp. 829-841. 2011.
- [11] Ahn, J., Wohn, K. Y. and Kong, D. Y., 3D digital documentation of dinosaur footprints. In Proc. of Int. Conf. on Virtual Systems and Multimedia. Seoul, Korea. pp. 340-345. 2010.
- [12] Bates, K. T., Manning, P. L., Vila, B. and Hodgetts, D., Three dimensional modelling and analysis of dinosaur trackways. Palaeontology. 51(4). The Palaeontological Association. pp. 999-1010. 2008.
- [13] Breithaupt, B. H., Matthews, N. A. and Noble, T. A., An integrated approach to three-dimensional data collection at dinosaur tracksites in the Rocky Mountain West. Ichnos. 11(1-2). International Ichnological Association. pp. 11-26. 2004.
- [14] Remondino, F., Rizzi, A., Girardi, S., Petti, F. M. and Avanzini, M., 3D ichnology-recovering digital 3D models of dinosaur footprints. The Photogrammetric Record. 25(131). Remote Sensing and Photogrammetry Society. pp. 266-282. 2010.
- [15] Lyons, P. D., Rioux, M. and Patterson, R. T., Application of a three-dimensional color laser scanner to paleontology: an interactive model of a juvenile Tylosaurus sp. basisphenoid-basioccipital. Palaeontologia Electronica. 3(2). Texas A & M University. p. 16. 2000.
- [16] 원광연, 김정률, 안재홍, 박진호. 천연기념물 공룡발자국 3D 기록 보고서(2차). 국립문화재연구소. 2008.

[17] 원광연, 김경수, 안재홍, 박진호. 천연기념물 공룡발자국 3D 기록 보고서(3차). 국립문화재연구소, 2009.

[18] 원광연, 김경수, 안재홍, 박진호. 천연기념물 공룡발자국 3D 기록 보고서(4차). 국립문화재연구소, 2010.

[19] 공달용, 임종덕, 원광연, 안재홍, 김경수. 천연기념물 화석산지의 3차원 디지털 기술 적용. 한국콘텐츠학회논문지, 11. 한국콘텐츠학회. pp. 492-502. 2011.

[20] Ohtake, Y., Belyaev, A. and Seidel, H. P.. Ridge-valley lines on meshes via implicit surface fitting. ACM Transactions on Graphics, 23(3). ACM. pp. 609-612. 2004.

[21] DeCarlo, D., Finkelstein, A., Rusinkiewicz, S. and Santella, A.. Suggestive contours for conveying shape. ACM Transactions on Graphics, 22(3). ACM. pp. 848-855. 2003.

[22] Judd, T., Durand, F. and Adelson, E.. Apparent ridges for line drawing. ACM Transactions on Graphics, 26(3). ACM. p. 19. 2007.

[23] Kolomenkin, M., Shimshoni, I. and Tal, A.. Demarcating curves for shape illustration. ACM Transactions on Graphics, 27(5). ACM. p. 157. 2008.

[24] Zhang, L., He, Y., Xie, X. and Chen, W.. Laplacian lines for real-time shape illustration. In Proc. of the 2009 Symposium on Interactive 3D graphics and games. Boston, USA. pp. 129-136. 2009.

[25] Miller, G. Efficient algorithms for local and global accessibility shading. In Proc. of the 21st annual conf. on Computer graphics and interactive techniques. Orlando, USA. pp. 319-326. 1994.

[26] Pharr, M. and Green, S.. Ambient occlusion. In GPU Gems 1. Addison-Wesley. pp. 279-292. 2004.

[27] Rusinkiewicz, S., Burns, M. and DeCarlo, D.. Exaggerated shading for depicting shape and detail. In ACM Transactions on Graphics, 25(3). ACM. pp. 1199-1205. 2006.

[28] Vergne, R., Pacanowski, R., Barla, P., Granier, X. and Schlick, C.. Light warping for enhanced surface depiction. ACM Transactions on Graphics, 28(3). ACM. p. 25. 2009.

[29] Thulborn, R. Dinosaur tracks. Chapman and Hall, 1990.

[30] Ramachandran, V. S. Perceiving shape from shading. Scientific American, 259(2). Scientific American. pp. 76-83. 1988.

[31] Belhumeur, P. N., Kriegman, D. J. and Yuille, A. L.. The bas-relief ambiguity. International Journal of Computer Vision, 35(1). Springer US. pp. 3-44. 1999.

[32] Christou, C. G. and Koenderink, J. J.. Light source dependence in shape from shading. Vision research, 37(11). Elsevier. pp. 1441-1449. 1997.

[33] Cole, F., Golovinskiy, A., Limpaecher, A., Barros, H. S., Finkelstein, A., Funkhouser, T. and Rusinkiewicz, S.. Where do people draw lines?. ACM Transactions on Graphics, 27(3). ACM. p. 88. 2008.



안재홍

1995년 3월 ~ 1997년 2월 서울대학교 기계설계학과(공학석사). 1997년 ~ 2000년 한국과학기술연구원 영상미디어연구센터 연구원. 2000년 ~ 2006년 (주)스리다임 디자인실장. 2006년 ~ 2009년 한국과학기술원 문화기술연구센터 선임연구원. 2009년 9월 ~ 현재 : 한국과학기술원 문화기술대학원 박사과정. 관심분야는 디지털 문화유산, 3차원 스캔, 가상현실임.



공달용

2004년 2월 경북대학교 지질학과(이학석사). 2011년 경북대학교 지질학과(이학박사). 2005년 ~ 2006년 경남 고성군청 학예연구사. 2006년 ~ 현재 문화재청 국립문화재연구소 학예연구사. 관심분야는 고생물학, 지질학, 디지털 문화유산임.



원광연

1981년 Wisconsin대학교 대학원 전산학과(공학석사). 1984년 Maryland대학교 대학원 전산학과(공학박사). 1981년 ~ 1984년 Maryland 대학 Computer Vision Lab. 연구조교. 1984년 ~ 1986년 Harvard 대학 응용과학부 강사. 1986년 ~ 1991년 Pennsylvania 대학 전산학과 조교수. 1991년 ~ 2005년 한국과학기술원 전산학과 교수. 2000년 ~ 2005년 한국과학기술원 가상현실연구센터 센터장. 2005년 ~ 2011년 한국 HCI 학회 학회장. 2005년 ~ 2011년 한국과학기술원 문화기술대학원 원장. 2005년 ~ 2012년 한국과학기술원 문화기술연구센터 센터장. 2005년 ~ 현재 한국과학기술원 문화기술대학원 교수. 관심분야는 문화기술, HCI, 가상현실임.