

3차원 디지털 문화재 기술의 최근 동향

□ 권 옹 무 / 한국과학기술연구원 영상미디어연구센터

Emerging Trends in 3D Digital Heritage

1. 개 요

최근 국내외적으로 문화재의 디지털화를 통한 3차원 디지털 문화재 데이터베이스 구축, 문화재 복원 및 재생, 교육 분야에의 활용 및 사이버 공간에서의 문화재 전시 기술, 지금까지 보지 못한 새로운 뷰에서의 문화재 렌더링 등에 대한 연구가 이루어지고 있다[1]. 대표적인 예로서 미국 및 이태리가 협력하여 미켈란젤로 의 David 상, Florentine Pieta 등의 디지털화를 통한 3차원 디지털 문화재 구축 연구가 이루어졌다. 국내에서도 국내 주요 문화재들의 디지털화에 대한 필요성을 크게 인식하고 있다. 이와 같은 디지털 문화재 구축을 위해서는 3차원 정밀 계측기술, 3차원 정보 합성 기술 등을 통한 3차원 디지털 모델링 기술이 필요하다.

본 고에서는 디지털 문화재 구축을 위한 기

반 기술에 대해 기술한다. 이를 위해 디지털 문화재 구축을 위한 기술로서 3차원 계측 및 모델링 요소 기술의 기본 원리 및 시스템 기술에 대해 기술한다. 그 다음으로 해외에서의 디지털 문화재 관련 연구 사례를 소개한다. 그리고 국내에서 디지털 문화재 구축을 위해 수행된 연구 결과에 대해 기술한다. 또한 최근 디지털 문화재의 공유를 위해 구축된 Virtual Heritage Network에 대해 살펴본다.

2. 3차원 계측 및 모델링 기술

2.1 3차원 계측 기술

대표적인 3차원 계측기술로는 레이저 스캐너를 사용하는 방식[2]과 컴퓨터 비전에 기반한 방식[3]이 있다.

레이저 스캐너 방식으로는 레이저 스트라이프 (stripe)를 순차적으로 대상에 주사하고

CCD 카메라를 통해 삼각 함수의 관계를 이용해 깊이 정보를 알아내는 방식과 time-of-flight 방식에 의해 레이저를 보내고 받는 시간에 의해 깊이 정보를 알아내는 방식이 있다. 레이저 스트라이프 사용방식으로는 Cyberware 사, Minolta 사 등에서 발표된 레이저 스캐너가 있으며 time-of-flight 방식으로는 Cyra Technologies 사에서 발표된 레이저 레인지 파인더가 있다.

그림 1은 스트라이프 기반 레이저 스캐너를 사용한 방식의 원리를 나타낸 것이다. 그림에 나타낸 바와 같이 3차원 계측 대상에 레이저 스트라이프를 주사하고 계측 대상의 깊이 정보에 의해 생기는 패턴을 CCD 카메라로 촬영 후에 영상을 분석함에 의해 계측 대상의 깊이 정보를 추출한다. 그림 2는 Galvano mirror를 사용하여 레이저 스트라이프를 오브젝트 상에 순차적으로 스캐닝 하는 원리를 나타낸 것이다.

컴퓨터 비전 방식의 기본 원리는 양안의 시차(binocular parallax) 개념을 기반으로 한다. 즉 스테레오 카메라를 사용하여 두 대의 카메라에 맺히는 상의 위치가 측정 대상의 깊이 정보에 따라 달라지는데 이렇게 다른 정도를 디스페리티(disparity)라고 부르며 이 디스페리티 정보로부터 대상 오브젝트의 3차원 정보를 추출해 낸다. 보다 구체적으로는 스테레오 카메라로부터 가까운 오브젝트의 경우는 큰 디스페리티를 가지며 먼 오브젝트의 경우는 작은 디스페리티를 가진다. 한편 디스페리티를 구하기 위해서는 스테레오 영상에서 서로 대응되는 대응 점을 구해야 하며 이에 대한 많은 연구 결과가 발표되어 있다.

깊이 정보의 정확성 및 3차원 구조를 보다 넓은 뷰에서 분석하기 위한 방법으로서 두 대

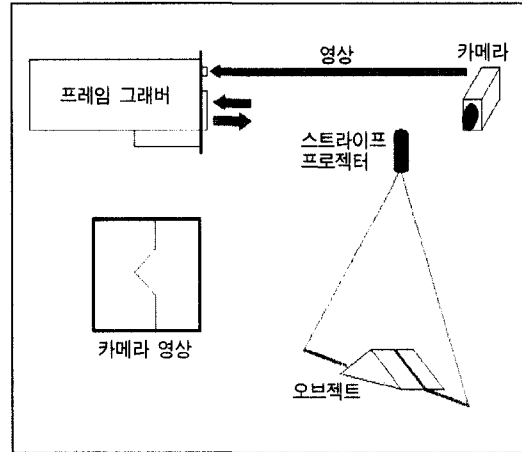


그림 1. 레이저 스캐너 원리

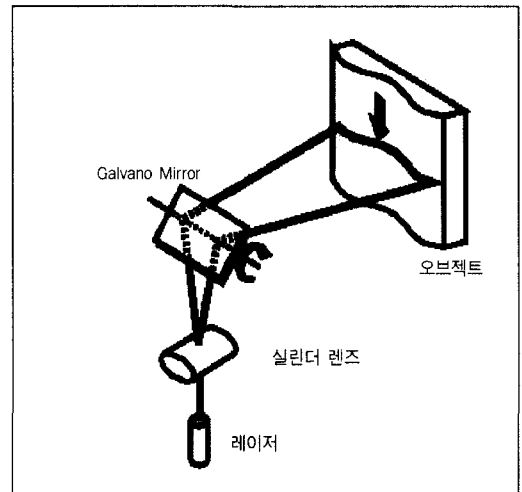


그림 2. Galvano mirror 에 의한 레이저 스캐닝

의 카메라를 사용하는 스테레오 방식을 확장한 여러 대의 카메라를 사용하는 방법이 제안되었으며 대표적인 방법으로서 MBS(Multiple Baseline Stereo) 기법이 있다.

2.2 3차원 모델링 기술

3차원 레이저 스캐너를 통해 얻어진 깊이 정

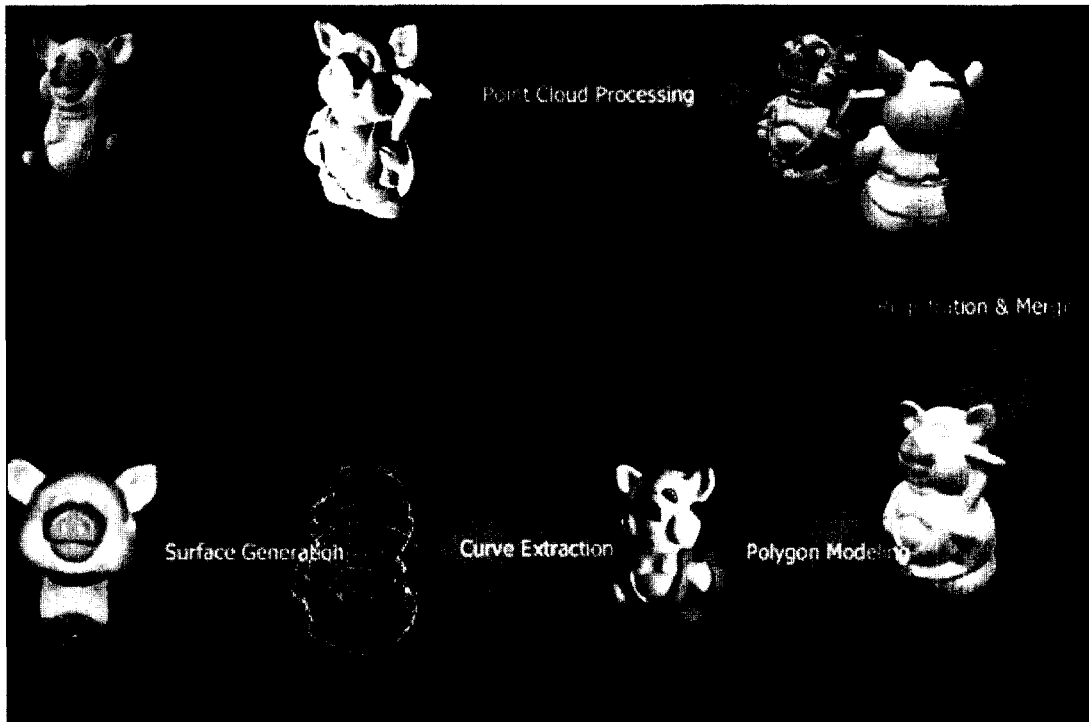


그림 3. 3차원 모델링 흐름도

보를 나타내는 포인트 데이터들을 바탕으로 측정 대상의 깊이 및 모양 정보를 최적으로 표현할 수 있는 메쉬(mesh)를 구성하고 이들 메쉬들로부터 3차원 모델을 제작한다. 그림 3은 스캐닝 된 포인트 데이터들로부터 3차원 모델을 만드는 과정을 나타낸 것이다.

레이저 스캐너를 통해 3차원 모델링을 하는 경우는 측정 대상의 크기 문제로 한번에 스캐닝이 어려우므로 여러 번에 걸쳐 스캐닝된 데이터들로부터 완전한 하나의 3차원 모델을 만드는 방법이 요구된다. 이때 단편적으로 만들어진 모델들을 결합할 때 레지스트레이션 기법이 요구되며 기본 원리는 결합하고자 하는 두 개의 모델에서 대응점들을 지정하면 이들 대응점

들의 관계로부터 최적의 결합을 시도하여 결합된 폴리곤 모델을 만든다.

기본 절차를 정리하면 다음과 같다. 포인트 데이터로부터 부분 폴리곤(partial polygon) 작성, 부분 폴리곤들의 정합을 통한 결합된 폴리곤 모델 작성, 전체를 결합한 폴리곤 모델 작성, 커브 추출 및 면 생성 과정, 텍스처 매핑을 통해 최종적인 3차원 모델이 만들어진다.

3. 해외의 디지털 문화재 연구 사례

3.1 미켈란젤로 프로젝트

연구사례중 3차원 정밀 측정 및 모델링 기술

을 바탕으로 수행된 미켈란젤로 프로젝트[4]를 소개한다. 미켈란젤로 프로젝트는 1997년 1월 미국과 이태리 협력 과제로 시작되었다. 사전 작업 단계로서 약 20 개월 걸쳐 레이저 기반 레인지 파인더(range finder) 및 큰 조각품을 스캐닝하기 위한 기계적인 지지대를 설계, 제작, 시험하였으며 1998년 9월 장비들을 이태리로 옮겼다. 실제 제작 단계로서 1998년 9월부터 1999년 6월까지 이태리에서 스캐닝 작업을 수행하였다.

본 프로젝트의 주요 대상은 23 feet의 David 상, 고대 건축물, 고대 로마의 지도가 새겨진 맵 프래그먼트(map fragment) 등이었다. 특히 본 프로젝트에서는 스캐닝 대상 오브젝트 상의 수 mm 이하의 끝 자국까지도 스캐닝 하기 위해 정밀 계측 기술을 사용하였다. 또한 23 feet 크기의 David 상의 측정을 위해 특수 리프터(lifter)를 설계 제작하였다. 즉 스캐닝을 위해 정밀도, 23 feet 높이의 조각품 측정, 측정하기가 어려운 부분의 측정을 고려하였다. David 상 측정을 위해서 Stanford Large Statue 스캐너를 Cyberware 사에서 특수 제작하였다. 깊숙하거나 내부에 위치하여 측정이 어려운 부분을 위해 Faro Technologies 사 및 3D Scanner Ltd.에서 jointed digitizing arm 및 small triangulation laser range finder를 제작하였다. 또한 건축물 측정을 위해서는 레이저의 time-of-flight 개념에 기반한 Cyra Technologies 사의 레이저 레인지 파인더를 사용하였다. 미국-이태리 협력 프로젝트(미켈란젤로 프로젝트)에 대한 개요는 표 1과 같으며 주요 데이터를 표 2에 제시하였다.

그림 4는 Michelangelo 프로젝트에서 David 상을 스캐닝 하는 장비 및 스캐닝 과정 예를

표 1. 미켈란젤로 프로젝트 개요

출처 및 기간	미국(Stanford Univ. of California), 이태리(Stanford Univ. of California & Grand) http://www.cba.stanford.edu/3d/dauid.htm (다우 기관)
주요 사용장비	Stanford large statue scanner (Cyberware) Jointed digitizing arm, small triangulation laser range finder(Faro Technologies, 3D Scanner Ltd.) Laser range finder (Cyra Technologies)
주요 측정 대상	Michelangelo statue(David 상, St. Matthew 상 등) 고대 건축물 고대 로마의 지도 fragments
프로젝트 기간	사전 작업 단계: 1997.1 - 1998.9 스캐닝 단계: 1998.9 - 1999.6
관련 홈페이지	http://www.cba.stanford.edu/3d/dauid.htm

표 2. 미켈란젤로 프로젝트의 주요 데이터

스캐닝한 오브젝트 수	statue (10개), building (2개), map fragment (1,163개)
오브젝트의 최소 최대 크기	1 inch (map fragment), 23 feet (the David)
데이터의 공간 해상도	0.25 mm for geometry, 0.125 mm for color
최대 복잡도	2 billion polygons + 7,000 images (the David)
최대 데이터 량	24 gigabytes (the David)
총 스캐닝 데이터 량	200 gigabytes
최대 스캐너 크기 및 무게	24 피트 크기, 1,800 파운드
이태리에 운반된 장비의 총 무게	4 톤
관련된 핵심 인원 수	22명
statue 의 평균 스캐닝 시간	1 주 (David 상은 1달)
스캐닝 총 시간	5,000 man-hour
데이터 처리 총 시간	4,000 man-hour
프로젝트 비용	US\$ 2,000,000

보인 것이다.

3.2 Pieta 프로젝트

이와 관련된 프로젝트로서 IBM TJ Watson 연구센터에서는 미켈란젤로의 Florentine Pieta 를 디지털화하는 프로젝트[5]를 수행하였다. 이 프로젝트에서는 앞의 미켈란젤로 프로젝트와는

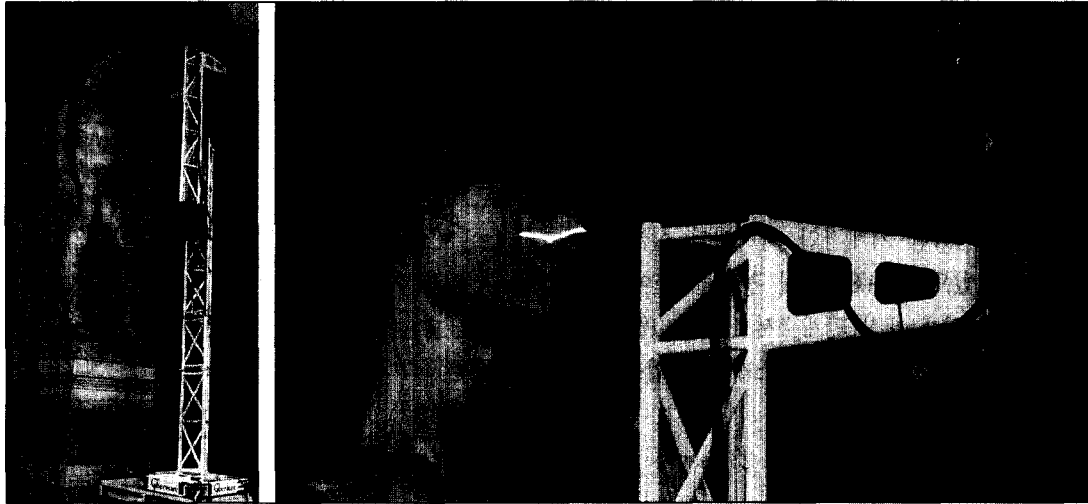


그림 4. David 상 측정 장치 및 레이저 스캐닝

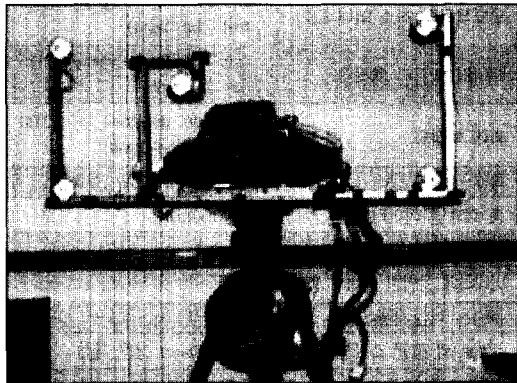


그림 5. 컴퓨터 비전 기반 3차원 계측 시스템



그림 6. 미켈란젤로 Florentine Pieta 3차원 계측 방식

달리 3차원 계측 방식으로서 카메라에 기반한 컴퓨터 비전 방식을 사용하였다. 본 프로젝트 내용은 1999년 SIGGRAPH에서 발표되었다. 본 프로젝트에 대한 자

세한 내용은 <http://www.research.ibm.com/pieta>에 있다. 그림 5는 Pieta 프로젝트에서 사용한 multiview 카메라 시스템으로서 동일한 조건에서의 영상 획득을 위해 조명을 사용하고 있다. 그림 6은 여러 대의 카메라 및 조명장치를 사용하여 Pieta를 부분별로 3차원 계측하는 예를 보인 것이다.

4. 국내의 3차원 디지털 문화재 구축 사례

4.1 개요

국내에서도 디지털 문화재 구축의 중요성을 인식하고 KIST 영상미디어연구센터에서는 가상현실기법을 도입해 천년전의 서라벌 모습을 가상으로 재현하여 경주세계문화엑스포 2000 주제영상관에서 보여주었다(<http://imrc.kist.re.kr/VR-theater.html>). 디지털 문화재 구축의 시작점으로서 경주 신라역사과학관(<http://bora.dacom.co.kr/~kchool/sokkuram/silla.html>)에 있는 1/5 석굴암 모형

을 3차원 모델링 하는 작업을 수행하였다. 기술적으로는 측정 대상의 특성, 작업 공간, 정확도, 비용 등을 고려하여 3차원 계측 방식으로서 레이저 스트라이프 기반 레이저 스캐닝 방식을 채택하였다. 석굴암 모형 스캐닝 작업은 2000년 3월 20일부터 2000년 3월 26일까지 일주일간 5명의 인원이 참여하여 수행하였다. 주 측정 대상은 주실의 본존석가여래좌상, 십일면 관세음보살상, 보살상(2구), 십대제자상(10구), 감실좌상(8구), 천부상(2구), 비도의 사천왕상(4구), 전실의 금강역사상(2구), 팔부신중상(8구) 이다. 스캐닝 한 데이터를 이용한 3차원 모델링 작업은 2000년 4월부터 8월까지 5개월에 걸쳐 3차원 메쉬 모델 생성, 메쉬 모델 최적화 작업, 텍스처 맵핑작업을 수행하였다.

4.2 3차원 계측

레이저 스캐너로는 Minolta Co.에서 제작한 Vivid 700 레이저 스캐너 (<http://www.minolta3d.com>) 를 사용하였다. Vivid 700 레이저 스캐너는 소형이며 이동 및 조작이 용이하다는 장점을 가진다. 또한 IBM PC 에 SCSI 로 연결하여 원격 제어가 가능하다.

Vivid 700 의 기본 원리는 앞의 그림 1 및 그림 2에 나타낸 바와 같다. 즉 Vivid 700 은 그림 1과 같이 횡방향의 스트라이프 빛을 렌즈를 통해 오브젝트에 방사하고 CCD 로 반사되어지는 빛을 받고 삼각 함수 법에 의해 거리 정보를 구해낸다. 또한 그림 2에 나타낸 바와 같이 이와 같은 과정을 종방향으로 이동해 가며 수행함에 의해 전체 오브젝트의 거리 정보를 구해낸다. 이때 종방향으로의 이동은 galvano mirror 를 사용하여 방사되는 스트라이프 빛의 위치를 제어한다.

미켈란젤로 프로젝트에서 사용한 Stanford Large Statue 레이저 스캐너와 본 연구에서 사용한 Vivid 700 의 방식을 비교하면 표 3에 나타낸 바와 같이 측정 방식의 원리는 동일하며 최대 측정 해상도에 차이가 있다. 즉 David 상 측정을 위해 특수 제작한 레이저 스캐너의 최대 측정 해상도는 0.25 mm이며 Vivid 700 레이저 스캐너는 0.35 mm로서 정밀도 면에서 차이가 있으며 3차원 계측 기본 원리는 동일하다. 정밀도를 보다 구체적으로 살펴보면 Vivid 700 레이저 스캐너로부터 한번의 스캐닝 작업에서 얻어지는 데이터는 200 point x 200 point (즉 40,000 개의 point 데이터) 이며 측정 영역이 70mm x 70mm 일 때 point 당 0.35mm의 측정 해상도를 가진다.

표 3. 레이저 스캐닝 방식 비교

	미켈란젤로 프로젝트 David 상 측정 방식	본 측정 방식 (석굴암 모형)
측정 방식	스트라이프 레이저 스캐닝 방식	스트라이프 레이저 스캐닝 방식
최대 측정 해상도	샘플링 피치 0.25 mm	샘플링 피치 0.35 mm

4.3 3차원 모델링 소프트웨어

본 연구에서는 Vivid 700 레이저 스캐너를 통해 입력되는 포인트 데이터들을 처리하여 3차원 모델화하는 프로그램으로서 국내 기술로 개발된 RapidForm (www.rapidform.com) 3D reverse modeler를 사용하였다. RapidForm은 3D 포인트 데이터 또는 폴리곤 데이터를 처리하는 기능을 가진다. 스캐너를 통해 입력되는 3D 포인트 데이터를 처리하여 부분 폴리곤 (partial polygon)을 만든 후 여러 번에 걸쳐 스캐닝된 부분 폴리곤들을 서로 대응되는 점을

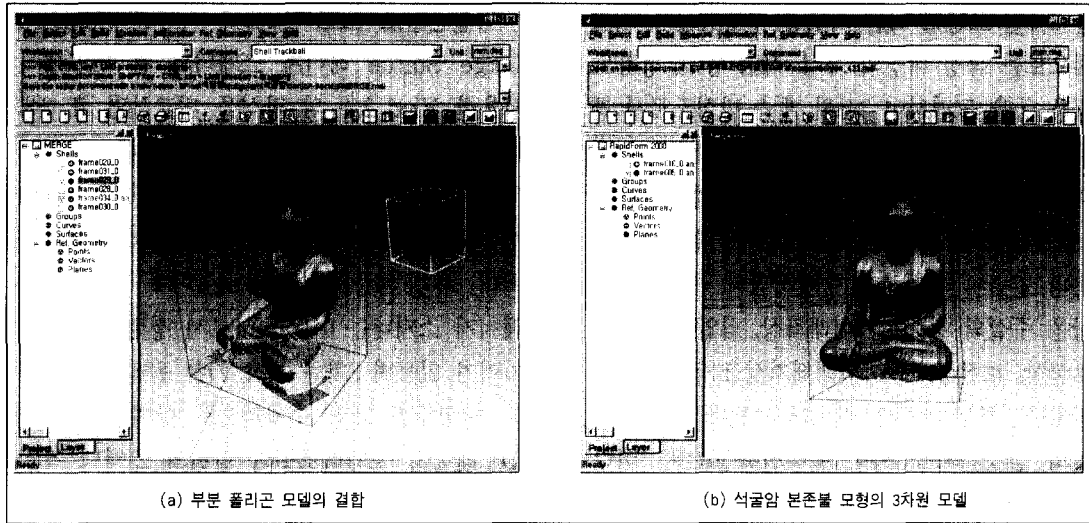


그림 7. 3차원 모델링 과정

통해 레지스트레이션 및 결합 동작을 거쳐 결합된 폴리곤을 만든다. 후처리로서 커브 추출 및 표면 생성을 통해 오브젝트 재구성을 수행한다. 그림 7은 Vivid 700 레이저 스캐너로부터 스캐닝한 포인트 데이터를 이용하여 부분별로 폴리곤 모델을 만들고 이들 부분 폴리곤 모델을 정합하여 석굴암 본존불 전체의 3차원 모델을 만드는 예를 나타낸 것이다. 그림 7(a)는 부분 폴리곤(partial polygon) 모델을 정합하여 결합하는 과정을 보이며 그림 7(b)는 이와 같은 과정을 거쳐 만든 석굴암 본존불 모형의 3차원 모델을 보인다. 그림 8은 석굴암 내부를 3차원 모델로 구성하고 임의의 뷰로 렌더링한 예를 나타낸다. 그림 9는 경주 세계문화엑스포 2000 주재영상관의 내부에서 가상현실 기법으로 디지털 석굴암을 보여주는 것을 나타낸다.

또한 본 연구센터에서는 서라벌의 주요 문화재의 3차원 모델링을 수행하였다. 구축된 주요 디지털 문화재로는 석굴암, 황룡사, 첨성대,



그림 8. 석굴암 3차원 모델의 렌더링 예

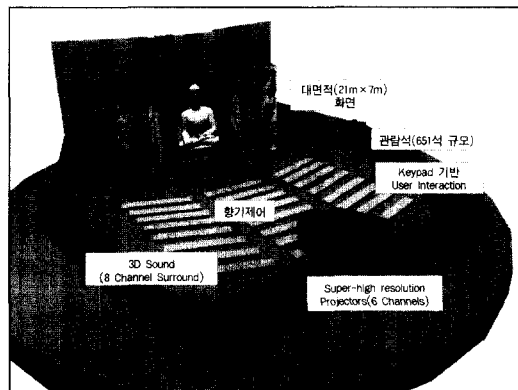


그림 9. 주재영상관에서의 가상현실 기반 디지털 석굴암

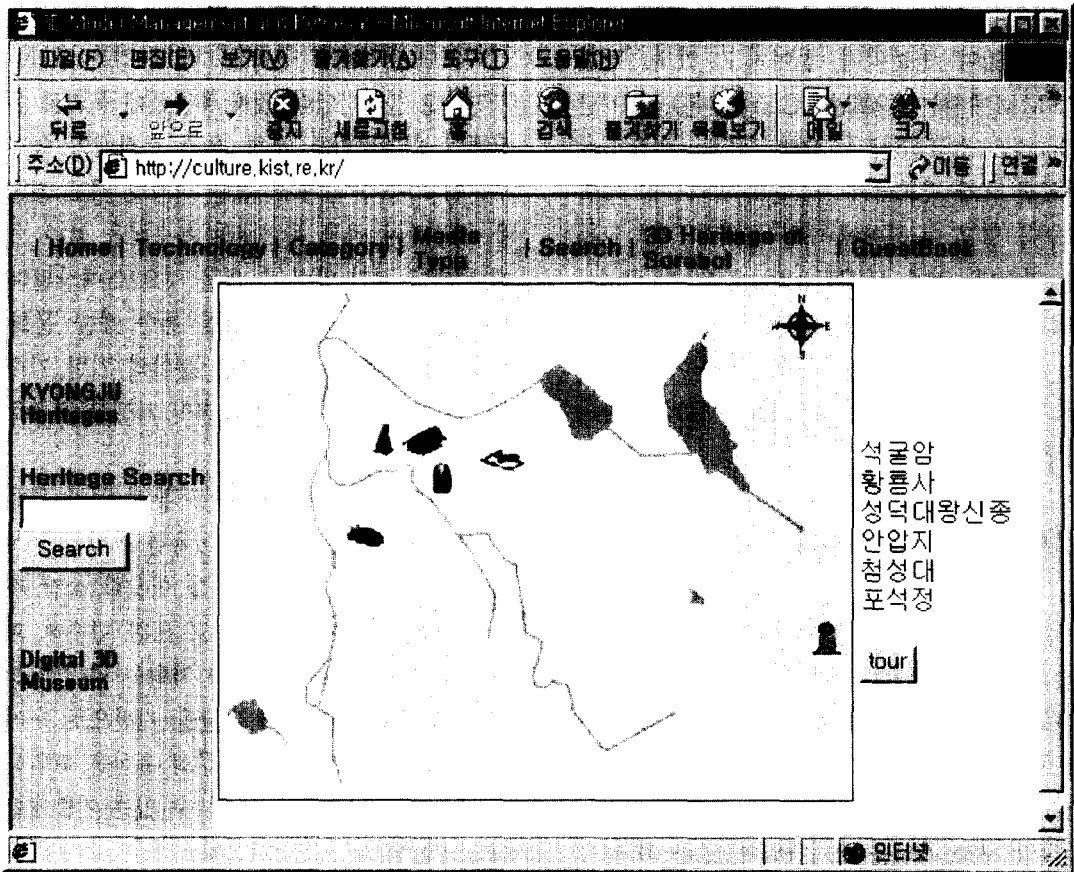


그림 10. 서라벌의 디지털 문화재 구축

안압지, 포석정, 성덕대왕신종, 분황사, 반월성 등이 있다. 이들 중 황룡사의 구층목탑은 고증을 통해 컴퓨터 그래픽 기술을 이용해 3차원 모델로 복원하였다. 현재 구축된 디지털 문화재들은 데이터베이스화되어 <http://culture.kist.re.kr>에서 3차원 모델(VRML 포맷) 및 동영상(avi 포맷)으로 볼 수 있다. 그림 10은 서라벌의 지도를 통해 디지털 문화재들을 선택하고 순차적으로 tour 하도록 한 예를 보인 것이다.

4. Virtual Heritage Network[6]

국제적으로 문화재 보존 및 공유를 위한 연구의 중요성이 크게 인식됨에 따라 국제 학회를 통해 이 분야에 대한 연구 협력이 진행되고 있다. 2000년 1월 VSMM(Virtual Systems and Multimedia) 국제 학회는 이와 같은 목적으로 VHN(Virtual Heritage Network) 조직을 구축하였다. VHN은 문화재 및 인류 자연유산의 보존, 해석, 교육을 위한 기술을 발전시키기 위한 국제 기관이다. VHN은 현재 가상

문화재와 관련한 단체에서 활동하고 있는 45개국의 250여 전문가가 참여하고 있다. 또한 VSMM에서는 1998년 (Gifu, 일본), 1999년 (Dundee, 스코틀랜드), 2000년 (Gifu, 일본)에 개최한 국제 학회에서 가상문화재에 대한 특별 세션을 열고 이 분야에 대한 국제적 연구 교류를 가졌다. 현재 VHN(www.virtualheritage.net) Membership-Links에는 벨기에, 프랑스, 독일, 그리스, 한국(KIST), 러시아, 영국에서 구축한 가상문화재 및 기술 자료가 연결되어 있다.

5. 맺음말 및 향후과제

본 고에서는 3차원 계측 기술 및 3차원 모델링 기술을 바탕으로한 3차원 디지털 문화재 기술에 대해 살펴보았다. 실제 디지털 문화재 구축 예로서 해외의 Michelangelo 프로젝트 및 Pieta 프로젝트 및 국내의 경우 3차원 디지털 석굴암 구축 과정을 소개하였다. 또한 최근 디지털 문화재의 공유를 위한 Virtual Heritage

Network에 대해 살펴보았다.

디지털 문화재의 구축은 다음과 같은 의미를 가진다고 볼 수 있다. 첫째 후손에게 물려줄 문화재의 디지털화를 통한 우리 문화재의 영구 보존이 가능하다. 둘째 첨단 디지털 정보 기술을 이용하여 한국 문화재의 우수성을 보다 쉽게 세계에 널리 알릴 수 있을 것으로 예상된다. 셋째 첨단 영상 기술 확보를 통한 예술, 문화, 관광, 영화, 영상 산업, 방송 분야의 기반 기술로 활용 및 새로운 시장 개척이 가능할 것으로 보인다.

향후 디지털 문화재 구축을 통해 국가 문화재 영구 보존, 첨단 기술을 이용한 유실된 문화재의 재현, 3차원 영상 기술을 이용한 실감 가상 박물관 구현이 이루어지고 또한 단순히 과거 문화유산의 보존 및 이해 차원을 넘어 가상 현실 및 첨단 인터랙션 기술을 기반으로 우리 선조들의 생활속에 몰입해 문화 유산을 체험하고 새로운 시각에서 느껴 볼 수 있는 기술개발이 요구된다.

● 참고 문헌 ●

- [1] Virtual Heritage, IEEE Multimedia, Vol. 7, No. 2, Apr. - June 2000.
- [2] Brian Curtes, "From Range Scans to 3D Models," ACM Computer Graphics, pp. 38-41, Vol. 33, No. 4, Nov. 1999.
- [3] Case Study: Scanning Michelangelo's Florentine Pieta, SIGGRAPH99, Aug. 1999.
- [4] 미켈란젤로 프로젝트, <http://graphics.stanford.edu/projects/mich>.
- [5] IBM 미켈란젤로 Florentine Pieta 프로젝트, <http://www.research.ibm.com/pieta>.
- [6] Virtual Heritage Network, <http://www.virtualheritage.net>

필자소개



권용무

- 1980년 : 한양대학교 전자공학과 학사
- 1983년 : 한양대학교 전자공학과 석사
- 1992년 : 한양대학교 전자공학과 박사
- 1983년 ~ 현재 : KIST 영상미디어연구센터 책임연구원