

# 3차원 복원 기술 동향

Recent Trends of 3D Reconstruction Technology

융합 시대를 주도할 디지털콘텐츠 기술 특집

추창우 (C.W. Chu)	CG기반기술연구팀 선임연구원
박지영 (J.Y. Park)	CG기반기술연구팀 연구원
김호원 (H.W. Kim)	CG기반기술연구팀 연구원
박정철 (J.C. Park)	CG기반기술연구팀 연구원
임성재 (S.J. Lim)	CG기반기술연구팀 연구원
구본기 (B.K. Koo)	CG기반기술연구팀 팀장

## 목 차

- .....
- I . 개요
  - II . 3차원 복원 기술
  - III . 응용 및 상용화
  - IV . 맺음말

\* 본 원고는 한국전자통신연구원의 내부모험사업 [한 대의 비디오 카메라를 이용한 동적 물체의 3D 모델링 및 애니메이션]의 지원으로 작성되었음.

3차원 복원 기술은 실세계에 존재하는 물체의 3차원 형상과 표면의 색상을 디지털화하는 기술이다. 일반적으로 가상현실, 게임, 애니메이션 등의 컴퓨터 그래픽스에 기반한 응용에서는 숙련된 디자이너가 수작업으로 3차원 모델을 제작하는데, 이는 시간이 많이 소요되고, 디자이너의 숙련도에 따라서 품질의 차이가 많은 단점이 있다. 뿐만 아니라 실세계에 존재하는 물체를 모델링할 때는 일일이 측정을 하는 과정을 거쳐야 하는 단점이 있다. 3차원 복원 기술은 이에 대한 대안으로 연구되고 있는 기술로써, 이미 많은 응용 분야에서 활용되고 있을 뿐만 아니라 새로운 서비스가 꾸준히 창출되고 있는 기술이다. 본 고에서는 3차원 복원 기술을 분류하고, 컴퓨터 비전 분야의 주연구 대상인 영상분석을 통한 3차원 복원 기술에 대해 설명한다. 또한, 3차원 복원 기술의 응용 사례와 상용화된 제품에 대해 설명하고, 향후 발전 방향을 제시한다.

## I. 개요

가상현실, 게임, 애니메이션 등 컴퓨터 그래픽스 (computer graphics)에 기반한 응용의 시작은 3차원 모델링으로부터 시작된다. 일반적으로 3차원 모델은 숙련된 디자이너가 컴퓨터 그래픽 소프트웨어를 이용하여 제작한다. 수작업에 의한 3차원 모델링 작업은 시간이 많이 필요하며, 세밀한 모델링에도 한계가 있다. 컴퓨터 그래픽스 분야에서는 사실적인 영상을 생성하기 위하여 물체의 기하구조를 단순하게 하는 대신 텍스처 매핑을 이용하여 재질을 표현하거나, 빛의 물리적인 특징을 시뮬레이션하는 래디오시티(radiosity)나 광선추적법(ray tracing)과 같은 알고리즘을 연구하였다. 하지만 물리적 시뮬레이션만으로 사실적인 영상을 생성하는 데는 근본적인 한계가 있다. 이에 대한 대안으로 영상을 분석하여 물체 표면의 재질과 실제계의 복잡한 광원을 모델링하는 연구와 함께 물체의 3차원 모델을 복원하는 연구가 활발히 진행되고 있다.

3차원 복원 기술은 제품 설계 및 검사, 역공학, 영상콘텐츠 제작 분야 등 전문가들이 주로 사용하던 기술이었으나, 최근에 Google에서 도시 지형의 3차원 모델링 기능이 포함된 위성 영상 서비스를 시작하면서 3차원 복원 기술에 대한 일반인의 관심이 높아졌다. 뿐만 아니라, 마이크로소프트사에서도 인터넷에 공유된 사진들을 이용하여 3차원 정보를 추출하고 사용자가 선택하는 임의의 뷰에 대한 이미지를 보여주는 새로운 서비스를 준비하고 있어서 사용자 창조형 콘텐츠의 보급과 함께 3차원 복원 기술의 수요가 확대될 전망이다.

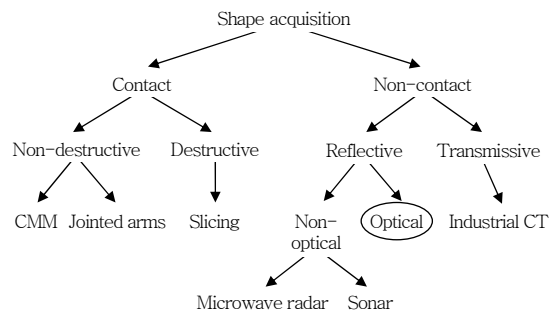
이와 같이 3차원 복원 기술은 다양한 응용분야를 가지고 있으나, 최근에는 비로소 대중적으로 주목받기 시작한 기술이다. 본 고에서는 3차원 복원 기술을 분류하고, 그 중에서 컴퓨터 비전 분야의 연구 대상인 영상으로부터 3차원 물체를 복원하는 기술과 응용 사례, 상용 제품을 소개하고, 앞으로의 발전 방향을 제시한다.

## II. 3차원 복원 기술

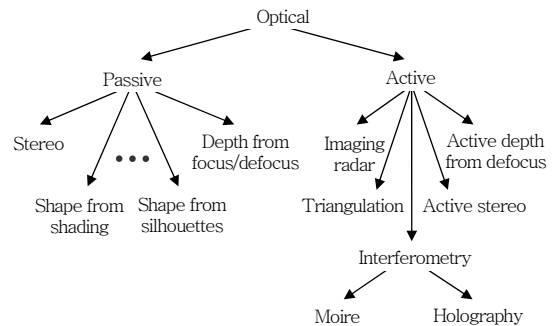
### 1. 기술 분류

물체의 3차원 복원 기술은 (그림 1)과 같이 접촉식과 비접촉식으로 구분할 수 있다[1]. 접촉식 3차원 복원은 복원 대상 물체의 측정부위를 측정 센서가 맞닿은 상태에서 3차원 좌표를 측정하는 방식으로, 고정밀의 3차원 측정 데이터를 획득할 수 있으나, 고무와 같이 압력이 가해지면 형태가 변하는 물체는 측정이 불가능하여, 이에 대한 대안으로 비접촉식 3차원 복원 기술이 많이 개발되고 있다. 비접촉식은 물체에서 반사하거나 투과되는 에너지 양을 측정하여 3차원 형상을 복원하는 방법이다. 그 중 물체의 외형을 3차원으로 복원하기 위해서는 물체에서 반사되는 에너지를 측정하는데 컴퓨터 비전 분야에서는 광학식 방법을 많이 연구하고 있다.

광학식 3차원 복원 방법은 센싱 방법에 따라 (그림 2)와 같이 능동 방식과 수동 방식으로 분류할 수



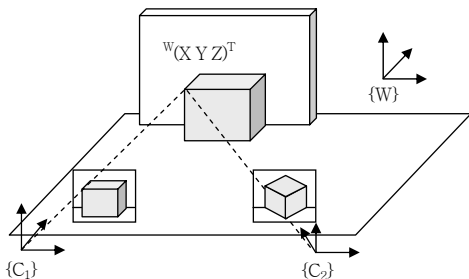
(그림 1) 3차원 복원 기술 분류



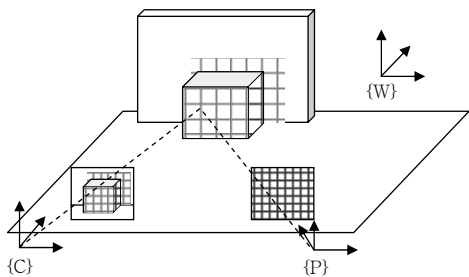
(그림 2) 센싱 방법에 따른 광학식 3차원 복원 기술 분류

있다[1]. 능동 방식은 미리 정의된 패턴이나 음파 등을 물체에 투사된 에너지 또는 초점 등의 센서 파라미터의 제어를 통한 변화량을 측정하여 물체의 3차원 형상을 복원하는 방식으로[2], 대표적인 방법에는 구조광(structured light) 혹은 레이저광을 물체에 투사하여 거리에 따른 위상변화를 측정하는 방식과 물체에 투사한 초음파가 반사되어 되돌아오는 시간을 측정하는 시간 지연 측정법(time of flight) 등이 있다. 반면에 수동 방식은 인위적으로 물체에 에너지를 투사하지 않은 상태에서 촬영한 영상의 명암(intensity), 시차(parallax) 등을 이용하는 방식이다. 수동 방식은 능동 방식에 비해 다소 정밀도는 떨어지나 장비가 간편하고, 입력 영상으로부터 텍스처를 직접 획득할 수 있는 장점이 있다.

광학식 3차원 복원 방법 중 구조광을 이용한 방식과 3차원 레이저 스캐닝 및 수동 방식은 삼각법(triangulation)을 이용하여 측정부분의 3차원 좌표를 계산한다. 즉, 카메라의 중심(center of projection)과 포착한 영상의 점을 지나는 3차원 직선들의 교차점을 계산하여 물체의 3차원 좌표를 획득한다.



{W}: 월드 좌표계, {C<sub>1</sub>}: 카메라1의 좌표계, {C<sub>2</sub>}: 카메라2의 좌표계  
(그림 3) 수동적 3차원 획득 방식



{W}: 월드 좌표계, {C}: 카메라 좌표계, {P}: 프로젝터 좌표계  
(그림 4) 능동적 3차원 획득 방식

(그림 3)과(그림 4)는 수동 방식과 능동 방식에서의 삼각법의 차이를 보여준다[3].

수동 방식에서는 (그림 3)과 같이 서로 다른 위치에서 촬영한 영상간에 대응되는 특징점들에게 삼각법을 적용하여 3차원 정보를 획득한다. 삼각법을 적용하기 위해서는 카메라 보정(calibration)을 통해 촬영 당시의 카메라의 위치와 자세를 알아야 한다. 수동 방식에서는 3차원 구조를 알고 있는 보정물체를 활용하지 않는 카메라 자동보정(camera self calibration) 기법을 주로 사용한다. 또한, 영상의 특징점을 추출하고, 영상정합(image registration)을 통해 영상간 대응관계를 설정한다. 특징점 추출을 위해서 Harris의 코너 추출 방법[4]과 SIFT[5]가 주로 사용되며, 영상 정합률을 높이기 위해 RANSAC [6]과 같은 오정합 제거 방법이 사용된다. 한편, 능동 방식에서는 (그림 4)와 같이 상황에 따라 적합하게 생성한 패턴을 물체에 투사하여 정합 문제를 해결한다. 또한, 삼각법을 적용하기 위해 물체가 놓일 곳에 카메라 보정 패턴을 놓고 촬영한 영상을 이용하여 미리 카메라 보정을 한다. 이때, 사용하는 카메라 보정 알고리즘은 Tsai의 방법[7]이 대표적이다.

본 장에서는 3차원 복원 기술 중에서 광학식 3차원 복원 기술의 연구 동향을 (그림 2)와 같이 센싱 방법에 의거한 분류를 따라 능동 방식과 수동 방식으로 나누어 서술한다.

## 2. 능동 방식

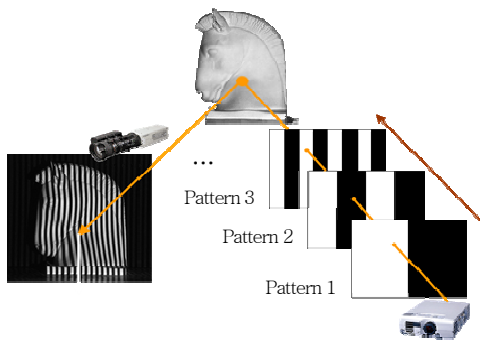
3차원 정보 획득을 위한 능동 방식은 3차원 위치 계산 방법에 따라 크게 광학적인 삼각측량 기법과 시간 지연 측정기법으로 나누어 볼 수 있다. 본 절에서는 삼각측량을 위해 사용되는 대표적 투영광인 구조광과 레이저, 그리고 초음파 도달시간에 의한 시간 지연 측정 방법에 관한 내용을 다룬다.

### 가. 구조광

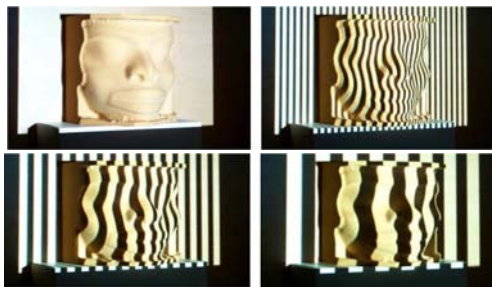
구조광을 이용한 능동적 방식의 3차원 정보 획득 기법은 (그림 5)를 통해 보이는 것과 같이 프로젝터

를 사용하여 코드화된 패턴영상을 연속적으로 투영하고 카메라를 통해 구조광이 투영된 장면의 영상을 획득함으로써 3차원 위치를 추정한다[3].

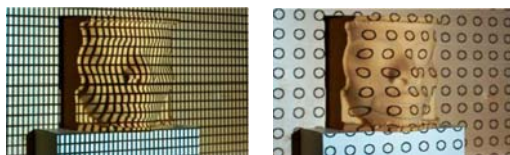
(그림 6)에서는 구조광을 이용한 3차원 정보 복원시 주로 사용하는 다양한 패턴영상을 보인다 [8],[9]. 이때 사용되는 패턴의 수는 코드화 기법과



(그림 5) 구조광을 이용한 3차원 정보 획득 기법

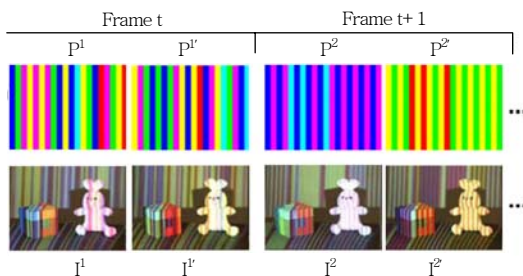


(a) 연속적으로 투영되는 Stripe 패턴



(b) Grid 패턴

(c) 원형 패턴

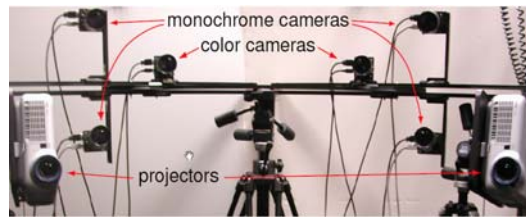


(d) 컬러 패턴

(그림 6) 다양한 패턴의 투영

컬러 사용 유무에 따라 결정된다. 여러 장의 이진 패턴을 사용하는 경우, 구현이 단순하고 고해상도의 깊이 맵을 얻을 수 있는 장점이 있으나 여러 장의 패턴영상을 연속적으로 투영해야 하므로 움직이는 물체가 있는 경우의 3차원 복원이 불가능한 단점이 있다[9]. 이러한 단점 극복을 위하여 그레이 혹은 컬러 패턴을 사용하여 패턴영상의 수를 줄일 수 있으나, 이 경우 깊이 맵의 해상도 한계와 컬러 오브젝트로 인한 에러 발생의 문제가 발생한다[10]-[12].

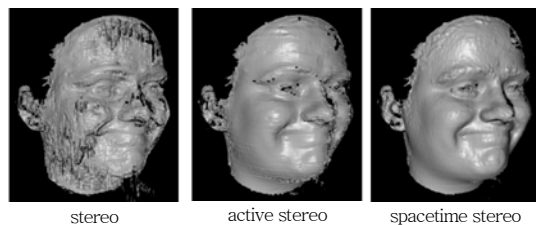
최근에는 능동적인 3차원 획득 방식인 구조광 기법과 여러 대의 카메라를 사용한 수동적인 기법을 조합함으로써 정확도와 해상도를 높이는 연구가 활발히 진행되고 있다. 이와 관련된 연구로서 (그림 7)



(a) Spacetime Faces: 고해상도의 얼굴 모델링 시스템, 카메라 6대, 프로젝터 2대로 구성됨



(b) 스테레오 카메라로 획득한 구조광 투영 영상



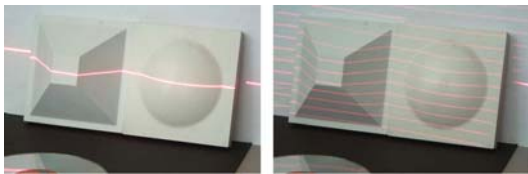
(c) 스테레오(좌), 구조광(중간), 융합(우) 방법의 성능 비교

(그림 7) 3D 정보 획득을 위해 능동 수동 융합 방식을 사용한 얼굴 모델링 시스템

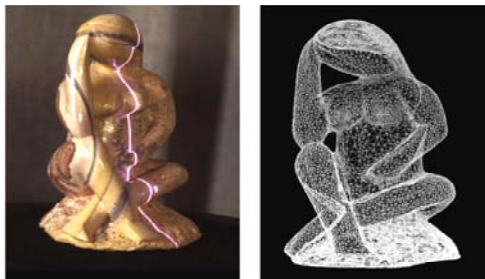
에서 나타내는 spacetime faces[13]는 고해상도의 얼굴 모델링 시스템이며, 3차원 정보획득을 위해 스테레오를 위한 두 대의 흑백 카메라와 구조광 투영을 위한 프로젝터를 동시에 사용하였다.

### 나. 3차원 레이저 스캐닝

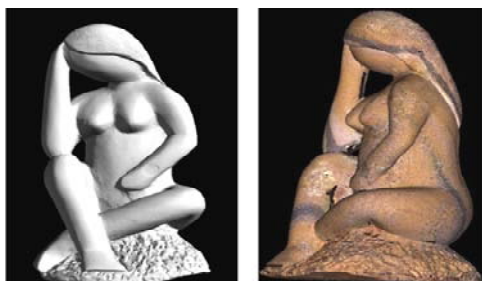
삼각측량을 위해 빛을 투영하는 기법에는 일반적인 프로젝터를 사용하는 구조광기법 외에 레이저를 투영하는 방법이 널리 사용되고 있다. 레이저는 다른 광원들에 비해 단색성과 직진성이 뛰어나고 밝기 또한 강하여 간섭을 최소화 할 수 있는 장점이 있다. 최근 상용화되는 3차원 레이저 스캐너들은 3차원 좌표 위치 데이터뿐 아니라 구조물 표면의 재질감까



(그림 8) 레이저 기반 라인 프로젝션 시스템



(a) 레이저 라인의 투영 (b) 3D 모델의 메시 표현 (100,000 폴리곤)



(c) 음영 효과가 추가된 3D 모델 (d) 컬러 텍스처가 반영된 3D 모델

(그림 9) 3D 컬러 스캔을 통한 모델링

지 표현 가능한 정확도를 보이고 있다. 따라서 각종 물체 모델링은 물론, 건축 토목을 위한 환경 복원에 이르기까지 널리 사용되고 있다. (그림 8)은 레이저 기반 라인 프로젝션 시스템의 사용을 보이며, 한 줄씩 스캔하는 방식이 일반적이거나, 여러 줄을 한 번에 투영하기도 한다[8]. (그림 9)는 레이저 스캔을 통해 획득한 3차원 정보와 컬러 텍스처의 조합으로 3D 모델링을 수행한 결과를 나타낸다[8].

### 다. 시간 지연

발신기로부터 발생한 초음파가 물체에 의해 반사되어 수신기에 도달하는 시간차(TOF)를 초음파의 진행 속도로 나누어 거리로 환산함으로써 3D 정보를 획득하는 기법이다. (그림 10)은 TOF를 사용한 3D 측정 장비를 사용한 결과를 보인다. 초음파 센서는 구성의 편이 및 가격적인 측면에서 이동 로봇에 많이 사용되고 있다. 이동 로봇은 초음파 센서를 사용하여 장애물과 단순한 거리 측정 이외에도 방위각 및 물체의 속도 등을 계산한다[14].



(a) 밝기 영상 (b) 그레이 레벨로 표현된 레인지 영상

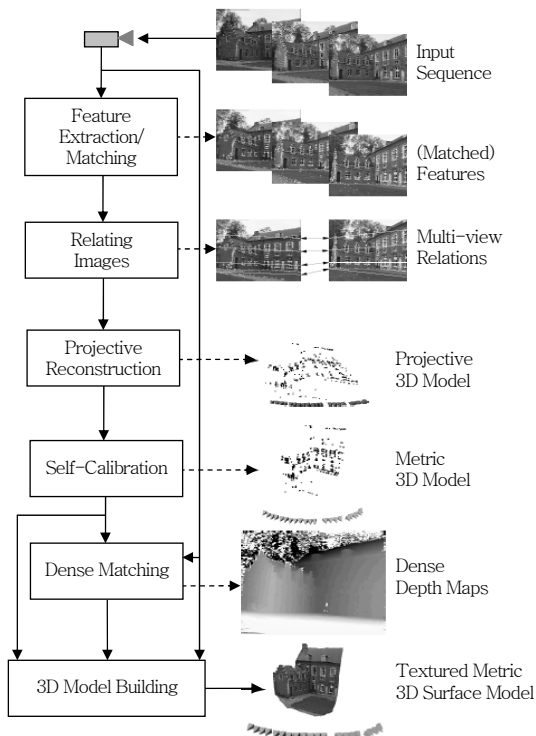
(그림 10) TOF 레인지 카메라

## 3. 수동 방식

영상으로부터 3차원 정보를 획득하기 위해서는 삼각법을 사용한다. 능동 방식은 물체에 패턴이나 레이저광을 투사하기 때문에 카메라가 고정된 상태에서 3차원 정보 획득이 가능하지만, 수동 방식은 촬영 당시의 카메라 위치와 자세를 알고 있다 하더라도 카메라가 고정된 상태로 촬영한 한 장의 사진에서는 3차원 위치를 알 수 없다. 따라서, 수동 방식

은 여러 위치에서 물체를 촬영한 영상을 사용하여 3차원 복원을 수행한다. 이때, 3차원 복원을 위해 사용하는 영상의 특징에 따라 structure from motion, space carving, shape from shading 등 다양한 방법으로 분류된다.

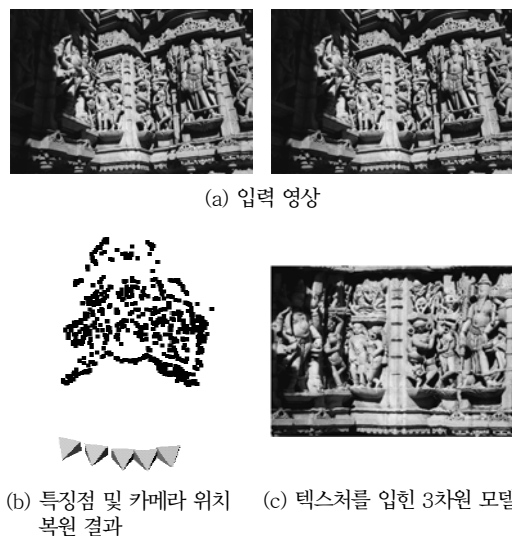
물체의 주위를 여러 위치에서 촬영할 때 발생하는 카메라의 움직임 유추하고, 이를 바탕으로 3차원 형상을 복원하는 것을 structure from motion이라고 한다. 다수의 영상으로부터 카메라의 움직임을 알아내기 위해서는 영상간의 대응관계를 알아야 한다. 영상의 대응 관계는 주로 코너와 같이 영상에서 추출이 용이한 특징점을 이용하며, 정합률을 높이기 위해 RANSAC 알고리즘을 많이 이용한다. 영상의 특징점은 Harris의 코너 추출 알고리즘이 많이 사용되나, 최근에는 영상에서의 크기 변화에 강인한 특징점을 추출하는 SIFT가 많은 관심을 받고 있다. (그림 11)은 structure from motion 방법의 순서도이다[15].



(그림 11) Structure from Motion 순서도

영상정합 과정을 마친 영상열로부터 사영 기하 공간의 3차원 모델을 생성하고, 카메라 자동보정 과정을 거쳐, 실세계의 유클리드 기하 공간과 스케일만 다른 metric 3차원 모델을 생성한다. 이로부터 조밀한 3차원 데이터를 생성하고, 텍스처를 추출하면 3차원 복원이 완료된다. (그림 12)는 structure from motion을 통해 3차원 복원한 예를 보여준다[15].

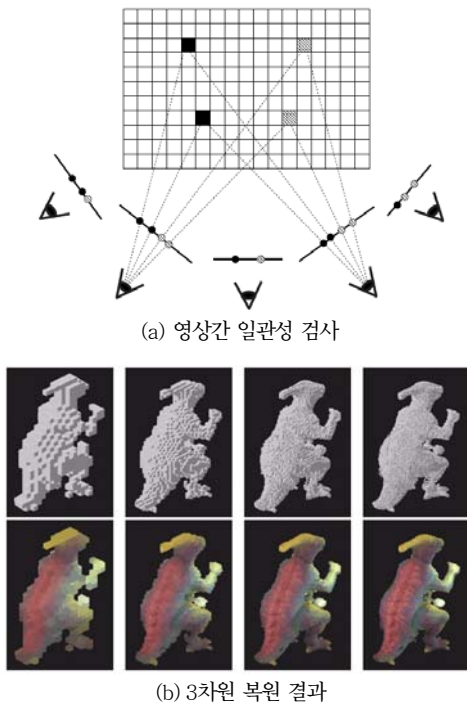
볼륨 기반 3차원 복원 방식은 생성한 모델을 입력영상에 재투사할 때 영상과 가장 일치하는 모델을 취함으로써 3차원 정보를 복원하는 것을 목적으로 한다. 즉, 물체가 놓여질 공간을 가정하고, 각 복셀(voxel)을 각 입력 영상에 투사하여 색상의 일관성과 가시성(visibility)을 만족하는 복셀은 남기고, 만족하지 않는 복셀은 버리는 방식으로 3차원 복원하는 방식이다. 대표적으로 복셀 컬러링(voxel coloring)[16]과 space carving[17] 알고리즘이 있다. Space carving 알고리즘은 복셀 컬러링에 비해 속도가 느리지만, 복원 대상 물체의 복잡도에 따라 복셀의 크기가 결정되고, 복원된 모델의 복셀은 입력 영상열과의 일관성이 보장되며, 영상 촬영 위치에 제약이 없다는 장점이 있다. 두 알고리즘은 일관성 검사 방식, 메시 생성 방법 등이 개선된 다양한 연구 결과들이 발표되었다[18]-[22]. (그림 13)은 Seitz



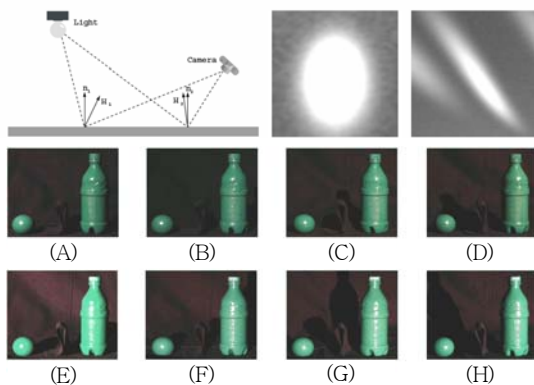
(그림 12) Structure from Motion 결과

의 복셀 컬러링 알고리즘의 복셀의 영상간 일관성 검사방식과 복원한 3차원 모델을 보여준다[16].

Shape-from-shading 방법[23]은 조명 광원의 위치와 물체 표면형상 및 특성, 그리고 카메라 시점에 따라 (그림 14)와 같이 카메라에서 관측되는 물체의 컬러변화를 BRDF와 같은 모델을 이용하여 물체의 표면형상을 복원하며, 최근에는 컬러영상으로



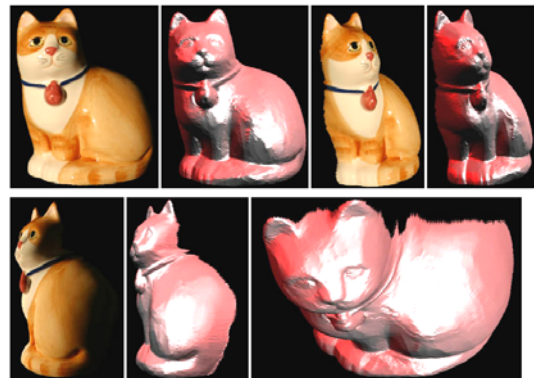
(그림 13) 복셀 컬러링 알고리즘



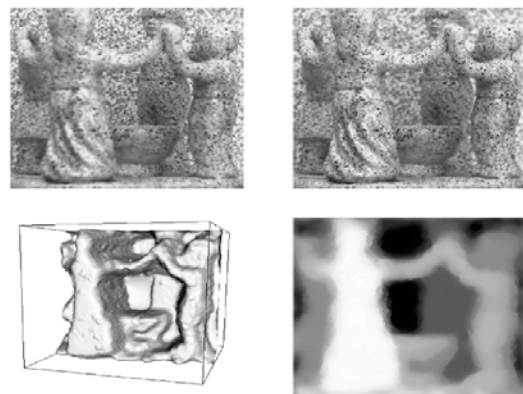
(그림 14) 광원의 위치변화에 따른 물체표면 반사특성과 실제 광원 위치를 이동시키며 얻은 영상들

확장되어 photometric stereo 방법[24]으로 연구가 진행되고 있다. (그림 15)는 카메라를 고정하고 광원을 변화시키며 얻은 영상들을 이용한 물체 복원 결과이다[24].

Shape from focus/defocus 방법[25]은 카메라에 입력되는 영상의 초점이 물체표면과 카메라간의 특정거리에서만 잡히는 특성을 이용한 복원 방법이다. 이를 위해 실제 고정초점렌즈를 사용하고 카메라를 이동시키는 방법과 카메라를 고정하고 줌렌즈를 사용하여 초점을 변화시키는 방법이 사용되고 있다. (그림 16)은 defocused 영상정보를 이용하여 물체의 깊이 정보를 얻은 결과이다[25].



(그림 15) Photometric Stereo 방법 복원: 광원위치 변화에 따른 입력영상과 복원된 물체 형상 정보



(그림 16) Shape from Focus/Defocus 방법 복원: 서로 다른 초점상태의 입력영상과 이를 이용하여 얻어진 Depth Map

### Ⅲ. 응용 및 상용화

#### 1. 응용 분야

지금까지 살펴본 3차원 복원 기술은 영상콘텐츠 제작뿐만 아니라 문화재 디지털화, 지리정보 시스템 등 다양한 분야에 적용되고 있다.

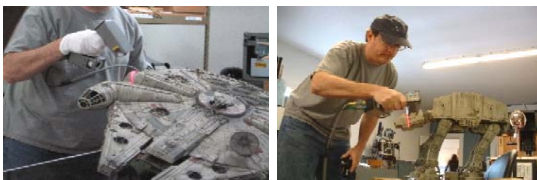
최근 개봉하는 대부분의 영화들은 과거에는 상상조차 하지 못했던 장면들을 선보이고 있다. 그 공간에는 디지털 시각효과(visual effect) 기술의 눈부신 발전이 있다. 3차원 복원 기술은 디지털 시각효과 대상이 되는 캐릭터 혹은 물체를 3차원 그래픽 모델로 디지털화하는 데 사용된다. 대표적인 예로 (그림 17)에서는 반지의 제왕과 스타워즈에 등장했던 캐릭터와 물체의 3차원 레이저 스캐닝 장면[26]을 보여준다.

3차원 레이저 스캐닝은 영상콘텐츠 제작 외에도 문화재의 디지털화에도 사용된다. 미국 스탠포드 대학에서는 디지털 미켈란젤로 프로젝트[27]를 통해 미켈란젤로의 조각 작품들을 3차원 스캐닝하여 데이터베이스화 하였다. 국내에서도 캄보디아의 앙코르와트 사원의 디지털화를 위해 3차원 스캐닝 기술을 사용하였다[28],[29]. 특히, 건물 외벽에 부조형식으로 조각된 압사라 여신을 3차원 스캐닝하여 전설 속의 압사라 여신을 3차원 캐릭터화하는 데 활용



(a) 반지의 제왕에 나오는 트롤 캐릭터

(b) 스캐닝 결과



(c) 스타워즈

(그림 17) 3차원 레이저 스캐너의 영상콘텐츠 제작 활용

하였다. (그림 18)은 3차원 레이저 스캐닝을 이용한 문화재 디지털화의 예를 보여준다[27],[29].

3차원 복원 기술은 위성 혹은 항공기에서 촬영한 영상에 적용할 수도 있다. 항공사진이나 위성사진에 스테레오 알고리즘을 적용하거나, 레이저 스캐닝 방식으로 지형을 측정한다. 이러한 방식을 확장하여 Google은 검색 기능을 위성 이미지, 지도, 지형 및 3D 건물 정보와 결합하여 전세계의 지역정보를 제공하는 Google Earth 서비스를 제공한다[30]. 또한, Google Earth는 인터랙티브 3차원 모델링 도구인 Google SketchUp을 통해 사용자가 쉽게 건물의 3차원 모델을 생성할 수 있는 기능을 제공한다. (그림 19)는 Google SketchUp을 이용해서 3차원 모델링한 예를 나타낸다.



(a) 디지털 미켈란젤로 프로젝트



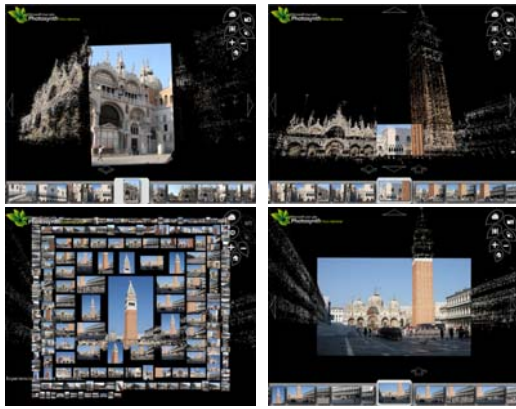
(b) 앙코르와트 사원의 부조 3차원 스캐닝

(그림 18) 3차원 레이저 스캐닝을 이용한 문화재 디지털화



(그림 19) Google Earth의 3차원 건물 보기





(그림 20) Microsoft사의 Photosynth 예제

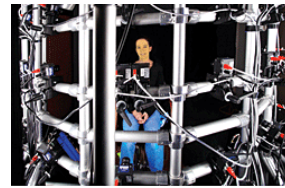
한편, Microsoft사에서는 photosynth[31]라는 새로운 개념의 서비스를 제공하기 시작했다. 이 서비스는 structure from motion 기법을 기반으로 한다. 한 사람 혹은 여러 사람이 촬영한 무수히 많은 영상으로부터 코너와 같은 특징점을 추출하고, 영상 간 대응관계를 선정한다. 이를 통해, 촬영 당시의 카메라 위치와 자세를 추출한다. Pollefeys[15]의 방법과 다른 점은 photosynth에서는 조밀한 3차원 데이터를 추출하지 않고, 대응되는 특징점의 3차원 좌표들만 점의 무리(point cloud) 형태로 가지고 있고, 사용자가 임의의 뷰를 선택하면, 그 뷰에 해당하는 영상과 3차원 점의 무리를 중첩하여 보여준다. 또한, photosynth의 장점은 카메라의 종류, 해상도, 촬영 시간 등의 제약 조건 없이 모든 영상을 사용할 수 있다는 것이다. (그림 20)은 이탈리아 베네치아의 산마르코 광장을 촬영한 사진들을 photosynth에 적용한 예이다[31].

## 2. 상용 제품

3차원 복원 기술은 여러 가지 형태의 제품으로 상용화되어 활용되고 있다. 능동 방식의 상용 제품은 3차원 레이저 스캐닝 시스템이 있다. 대표적인 것으로 Cyberware사[32]의 제품들(그림 21) 참조)과 Polhemus사[33]의 휴대형 3차원 레이저 스캐닝 시스템(그림 17) 참조)이 있다. 특히, Cyberware사의 3차원 스캐닝 시스템은 디지털 미켈란젤



(그림 21) Cyberware사의 3차원 스캐닝 시스템



(a) 캡처 시스템



(b) 입력 영상

(c) 3차원 복원 결과

(그림 22) Mova사의 Contour Reality 캡처 시스템

로 프로젝트에서 사용한 것으로 유명하며, 3차원 데이터와 컬러 정보를 빠르게 획득한다.

3차원 레이저 스캐닝 방식은 레이저 광원의 스캐닝 속도로 인해 움직이지 않는 물체의 스캐닝만 가능하다. 한편, Mova사[33]의 contour reality 캡처 시스템(그림 22) 참조)은 마커를 사용하지 않는 고해상도 표면 캡처 시스템이다. 마커를 사용하지 않는 대신, 어둠 속에서 빛을 발하는 인광성 화장품으로 분장한다. 영상 획득은 광원을 빠른 속도로 깜빡거리면서 캘리브레이션된 위치에서 동기화된 비디오 카메라로 촬영한다. 분장한 화장품은 어둠 속에서 촬영한 영상에서 점 패턴의 역할을 하기 때문에 3차원 기하 정보를 추출하는 데 사용하고, 광원을 켜 상태로 촬영한 프레임으로 텍스처를 추출한다. 실시간 영상캡처한 후 오프라인으로 작업을 하기 때문에 움직이는 모델의 3차원 정보도 추출 가능하다.

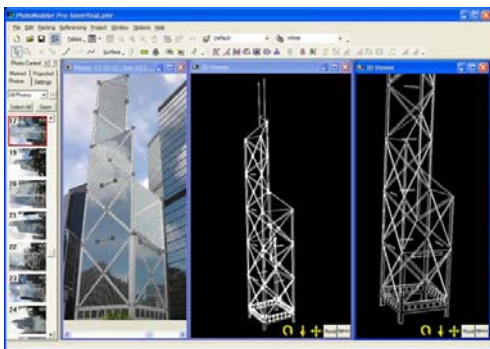
대표적인 영상기반 모델링 소프트웨어인 Image Modeler를 만든 RealViz사[34]에서 3차원 카메라

트래킹에 기반한 모션캡처 솔루션인 Movimento를 출시하였다. 이 시스템은 structure from motion 기법에 기반한 것으로, 여러 위치에서 촬영한 영상에서 마커를 추출하고 마커의 대응관계를 통해 3차원 좌표를 복원하는 것으로, 기존의 모션캡처 시스템과는 적외선 카메라를 사용하지 않는 차이점이 있다(그림 23) 참조).

그 밖에 structure from motion 기법에 기반한 영상기반 모델링 소프트웨어로 RealViz사의 Image Modeler[34]와 EOS System사의 PhotoModeler [35]가 있다. 이들은 사진으로부터 건축, 고고학, 공학, 웹 페이지 디자인, 3D 그래픽스 등의 분야에 적용되는 3D 모델을 생성하는 솔루션이다. Image Modeler는 간단한 폴리곤 기반의 3차원 모델링을 지원하는 반면, PhotoModeler는 NURBS 기반의 곡면 모델링 시스템이다. (그림 24)는 PhotoModeler의 스크린샷이다.



(그림 23) Movimento 솔루션



(그림 24) PhotoModeler를 이용한 삼차원 건축물

## IV. 맺음말

지금까지 다양한 3차원 복원 기술과 응용사례, 상용 제품에 대해 설명하였다. 3차원 복원 기술은 제조산업 및 영상콘텐츠 제작, GIS 분야, 다지점 영상 등 다양한 응용분야를 가진 기술이다. 또한, Google Earth 뿐만 아니라 Microsoft사에서 준비중인 photosynth 서비스 등 지금까지 실험실에서 수행해온 연구 결과물이 일반인을 위한 서비스로 제공되고 있거나 준비중이다. 특히, 이들 서비스는 기술 분류 중 수동 방식에 해당하는 것으로, 특별한 장비가 필요하지 않아 일반인이 사용하기에 적합하다. 현재는 사용자 참여형 콘텐츠의 폭발적 증가에 힘입어, 지금까지 산업계에 활발히 적용되어 온 능동방식의 3차원 스캐닝 기술은 물론, 수동 방식의 3차원 복원 기술도 새로운 서비스 영역으로 대두되고 있다. 더욱 다양해진 사용자들의 요구와 3차원 복원 기술의 발전 흐름에 맞추어 보다 정확하고 사용하기 쉬운 3차원 복원 기술 개발과 함께 새로운 사업 모델 발굴에도 힘을 쏟아야 할 것이다.

## 약어 정리

BRDF	Bidirectional Reflection Distribution Function
DEM	Digital Elevation Model
NURBS	Non-Uniform Rational B-Spline
RANSAC	Random Sample Consensus
SIFT	Scale Invariant Feature Transform
TOF	Time of Flight

## 참고 문헌

- [1] Brian Curless, Siggraph 2000 Courses on 3D Photography, Siggraph2000, New Orleans, Louisiana, July 2000.
- [2] Emanuele Trucco and Alessandro Verri, Introductory Techniques for 3-D Computer Vision, Prentice Hall, 1998.

- [3] J. Pages, J. Salvi, R. Garcia, and C. Matabosch, "Overview of Coded Light Projection Techniques for Automatic 3D Profiling," *IEEE Int'l Conf. on Robotics and Automation*, Taipei, Taiwan, Sep. 2003.
- [4] C. Harris and M. Stephens, "A Combined Corner and Edge Detector," *Proc. of the 4th Alvey Vision Conf.*, 1988, pp.147-151.
- [5] D.G. Lowe, "Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints," *Int'l Journal of Computer Vision*, Vol.60, No.2, 2004, pp.91-110.
- [6] M.A. Fishler and R.C. Bolles, "Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography," *Comm. of the ACM*, Vol.24, 1981, pp.381-395.
- [7] Roger Y. Tsai, "An Efficient and Accurate Camera Calibration Technique for 3D Machine Vision," *Proc. of IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition*, Miami Beach, FL, 1986, pp.364-374.
- [8] J. Beraldin, Francois Blais, Luc Cournoyer, Guy Godin, and Marc Rioux, "Active 3D Sensing," NRC Technical Report 44159, Ottawa, 2000.
- [9] J. Posdamer and M. Altschuler, "Surface Measurement by Space-encoded Projected Beam System," *Comput. Graphics Image Processing*, Vol.18, 1982, pp.1-17.
- [10] S. Inokuchi, K. Sato, and F. Matsuda, "Range Imaging System for 3-D Object Recognition," *Proc. 7th Int'l Conf. Pattern Recognition*, 1984, pp.806-808.
- [11] D. Caspi, N. Kiryati, and J. Shamir, "Range Imaging with Adaptive Color Structured Light," *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, Vol.20, No.5, May 1998, pp.470-480.
- [12] J. Gühring, "Dense 3D Surface Acquisition by Structured Light Using Off-the-Shelf Components," *Proc. Videometrics and Optical Methods for 3D Shape Measuring*, SPIE, 2001, Vol.4309, pp.220-231.
- [13] L. Zhang, N. Snavely, B. Curless, and S.M. Seitz, "Spacetime Faces: High Resolution Capture for Modeling and Animation," *ACM Transactions on Graphics*, Vol.23, No.3, 2004, pp.548-558.
- [14] T. Yata, "Direction Measurable Ultrasonic Sensing System for Mobile Robots," Ph.D Thesis, Tsukuba Univ., 2000.
- [15] Marc Pollefeys, "Obtaining 3D Models With a Hand-Held Camera," Courses on Siggraph 2001, Aug. 2001.
- [16] S. Seitz and C. Dyer, "Photorealistic Scene Reconstruction by Voxel Coloring," *Int'l Journal of Computer Vision*, Vol.35, No.2, 1999, pp.151-173.
- [17] Kiriakos N. Kutulakos and Steven M. Seitz, "A Theory of Shape by Space Carving," *Int'l Journal of Computer Vision*, Vol.38, No.3, 2000, pp.199-218.
- [18] G. Slabaugh, B. Culbertson, T. Malzbender, and M. Stevens, "Methods for Volumetric Reconstruction of Visual Scenes," *Int'l Journal of Computer Vision*, Vol.57, No.3, 2004, pp.179-199.
- [19] G. Zeng, S. Paris, L. Quan, and F. Sillion, "Progressive Surface Reconstruction from Images Using a Local Prior," In ICCV, 2005, pp.1230-1237.
- [20] V. Kolmogorov and R. Zabih, "Multi-camera Scene Reconstruction via Graph Cuts," In ECCV, Vol.III, 2002, pp.82-96.
- [21] S. Sinha and M. Pollefeys, "Multi-view Reconstruction Using Photo-consistency and Exact Silhouette Constraints: A Maximum-flow Formulation," In ICCV, 2005, pp.349-356.
- [22] Howon Kim and In So Kweon, "Appearance-Cloning: Photo-Consistent Scene Recovery from Multi-View Images," *Int'l Journal of Computer Vision*, Vol.66, No.2, 2006, pp.163-192.
- [23] Berthold K.P. Horn and Michael J. Brooks, *Shape from Shading*, The MIT Press, Cambridge, MA, 1989.
- [24] Aaron Hertzmann and Steven M. Seitz, "Example-Based Photometric Stereo: Shape Reconstruction with General, Varying BRDFs," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 27, No.8, Aug. 2005, pp.1254-1264.
- [25] P. Favaro, A. Mennucci, and S. Soatto, "Observing Shape from Defocused Images," *Int'l Journal of Computer Vision*, Vol.52, No.1, 2003, pp.25-43.
- [26] Polhemus사, <http://www.polhemus.com>
- [27] The Digital Michelangelo Project, <http://www.graphics.stanford.edu/projects>
- [28] 앙코르와트 캐릭터용 스캔과 캐릭터 매핑, Graphics Live 2006년 6월호, pp.134-143.
- [29] 앙코르와트 디지털콘텐츠화, <http://angkorwat.culture-content.com>
- [30] Google Earth, <http://earth.google.com>
- [31] Photosynth, <http://labs.live.com/photosynth>
- [32] Cyberware사, <http://www.cyberware.com>
- [33] Mova사, <http://www.mova.com>
- [34] Realviz사, <http://www.realviz.com>
- [35] PhotoModeler, <http://www.photomodeler.com>