

랜덤 패턴 투영을 이용한 스테레오 비전 시스템 기반 3차원 기하모델 생성

나상욱, 조선대학교 산업공학과 대학원
손정수, 조선대학교 산업공학과 대학원
박형준, 조선대학교 산업공학과 교수

3D geometric model generation based on a stereo vision system using random pattern projection

Sang-Wook Na, Department of Industrial Engineering, Chosun University
Jeong-Soo, Son, Department of Industrial Engineering, Chosun University
Hyungjun Park, Department of Industrial Engineering, Chosun University

Abstract

3D geometric modeling of an object of interest has been intensively investigated in many fields including CAD/CAM and computer graphics. Traditionally, CAD and geometric modeling tools are widely used to create geometric models that have nearly the same shape of 3D real objects or satisfy designers intent. Recently, with the help of the reverse engineering (RE) technology, we can easily acquire 3D point data from the objects and create 3D geometric models that perfectly fit the scanned data more easily and fast. In this paper, we present 3D geometric model generation based on a stereo vision system (SVS) using random pattern projection. A triangular mesh is considered as the resulting geometric model. In order to obtain reasonable results with the SVS-based geometric model generation, we deal with many steps including camera calibration, stereo matching, scanning from multiple views, noise handling, registration, and triangular mesh generation. To acquire reliable stere matching, we project random patterns onto the object. With experiments using various random patterns, we propose several tips helpful for the quality of the results. Some examples are given to show their usefulness.

Keywords: geometric model generation, stereo vision system, random pattern projection, stereo matching, triangular mesh

1. 서론

CAD/CAM, 3D 컴퓨터 그래픽스, 의공학 등 여러 분야에서 원하는 물체의 3차원 기하모델링(geometric

modeling) 기술이 널리 연구되고 있다[12-14]. 3차원 기하모델을 얻는 방법에는 크게 두 가지가 있다. 대상 물체를 Unigraphics, Maya, 3D Studio Max 등과 같은 CAD 또는 기하모델링 소프트웨어를 이용하여 원하는 물체와 비슷하거나 설계자 의도를 만족시키는 형상을 모델링 하는 방법이 있으며, 실제 물체의 형상을 측정하여 얻어진 3차원 측정 데이터를 쉽고 빠르게 처리하여 기하모델을 생성하는 방법이 있다. 기존에는 전자의 방식이 많이 이용되었지만 최근에는 형상 역공학 기술의 발전으로 여러 측정 기술들을 이용한 형상복원(shape reconstruction)에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다.

본 연구에서는 두 개의 CCD 카메라와 LCD 프로젝터를 이용한 스테레오 비전 시스템(stereo vision system) 기반 3차원 기하모델 생성에 대해 다룬다. 기존 스테레오 비전 연구에서 영상 일치점(correspondence)을 효율적으로 찾기 위한 많은 방법들이 제시되었다. 본 연구는 표면이나 배경 텍스처(texture)에 의해 형상 정확도가 달라진다는 점에 근거하였다. 빔 프로젝터로 물체 표면에 랜덤 무늬를 투영함으로써 일치점을 효율적으로 찾는 연구를 진행하였다. 이는 물체의 표면에 텍스처가 없거나 단순한 모델에서도 스테레오 비전을 효과적으로 적용할 수 있다. 결과 기하모델로서 삼각형들의 집합인 삼각망(triangular mesh)이 생성된다. 그림 1은 3차원 기하모델 생성 과정을 보여준다. 측정하려는 물체에 LCD 프로젝터를 이용하여 랜덤 패턴을 투영한 후, 카메라 보정을 통해 구축된 스테레오 비전 시스템을 이용하여 원하는 물체의 형상을 여러 방향에서 측정하고 잡음 부분을 제거하였다. 그 후 점 데이터를 연결하여 삼각망으로 만들고, 생성된 삼각망들 중 공통된 영역을 바탕으로 정합(registration)을 수행함으로써 결과 삼각망을 생성한다. 본 연구에서는 이러한 생성과정 동안 사용자 편의성과 삼각망 품질에 도움이 되는 고려사항

들을 소개한다.



그림 1. 3차원 기하모델 생성 절차

2. 역공학 기반 형상 모델링

역공학이란 실제 물체로부터 공학적인 개념 또는 모델을 생성하는 것을 말한다. 특히 형상 역공학은 주어진 실물로부터 CAD/CAM에 용이한 기하모델을 생성하는 것을 의미한다. 역공학은 쾌속조형(rapid prototyping), CAE, 의료, 오락, 문화 분야 등의 여러 응용분야에 이용될 수 있고, 이를 통해 제품 개발 기간이나 콘텐츠 제작 기간의 혁신적인 단축이 가능하다. 역공학 과정은 실물을 측정하고, 측정된 데이터로 곡면을 생성하며 마지막으로 CAD 모델을 생성하는 단계로 이루어진다.

현재 사용되는 실물 측정기술은 크게 접촉식 방법과 비접촉식 방법으로 나눌 수 있는데 접촉식 방법으로는 접촉 프로브를 이용하는 CMM 등을 들 수 있고, 비접촉식 방법으로는 데이터 획득 방법에 따라 CT나 MRI와 같이 투과된 에너지를 이용하는 방법과 초음파, 레이저, 빛 등의 반사된 정보나 광학을 이용하는 방법으로 다시 분류할 수 있다[1,10]. 접촉식 방법은 저렴하고 정확한 데이터 획득이 가능한 반면, 측정 속도가 느리고 대부분이 수작업으로 이루어지며 자유 곡면이나 접촉 불가능한 재질의 경우 한계가 있다. 따라서 최근에는 측정 속도가 빠르고 제약이 적은 비접촉식 기술이 많이 이용되고 있다. 그 대표적인 예로 스테레오 비전을 이용한 형상 측정기술은 구성이 간단하면서 환경의 제약이 적어 이에 대한 많은 연구가 진행되고 있다.

측정된 데이터는 측정오차를 포함하고 있으며, 많은 경우 불규칙적인 형태를 가지므로 기하모델 생성 시 숙련된 작업자의 오랜 작업시간을 필요로 한다. 측정 장비의 특성상 대상물을 한번에 측정하는 데는 제약이 따른다. 그래서 한 물체에 대해 서로 다른 시점 또는 서로 다른 센서로부터 얻어진 두 개 이상의 데이터를 하나의 좌표계로 이동시키고 형상을 정합하는 과정이 필요하다.

3차원 정합 기법에는 사용되는 데이터의 종류에 따라 크게 primitive-based 방법과 surface-based 방법으로 나뉘어진다[2]. Primitive-based 방법은 영상의 특징 점, 윤곽선 또는 표면조각을 이용하는 방법으로서 일반적으로 많이 사용하고 있으나 영상으로부터 특징을 추출해 내는 것이 어렵다는 단점이 있다. Besl과 McKay에 의해서 제안된 ICP 알고리즘이 대표적이다[3, 15]. Surface-based 방법은 비교적 정확한 결과를 얻을 수 있는 반면, 두 영상간의 사전정보가 요구되며, 두 영상간의 움직임이 적어야 하고 잡음이 많은 경우에는 적용하기 어렵다는 단점이 있다.

역공학 기술은 기존에 실물을 CAD 시스템이나 형상 모델링 시스템에서 사용하기 위해 실물과 똑같이 드로

잉 하는 시간을 절약하게 해준다. 하지만 드로잉 틀에 비해 3차원 측정 장비는 고가의 장비로 구성된다. 그래서 기술적으로 많은 발전이 이루어졌지만 실제 현장에서 3차원 측정기의 사용이 제한적이다. 또한 측정된 데이터를 후처리 및 정합하는데 사용되는 소프트웨어들 또한 어렵고 복잡한 개념으로 많은 시간과 노력이 필요하다.

3. 측정 시스템 구성

본 연구에서는 두 대의 카메라와 LCD 프로젝터를 이용하여 사람의 시각과 같은 거리인식 방법을 응용한 스테레오 비전 기반 측정 시스템을 구축하였다. 그림 2에서와 같이 스테레오 비전 시스템은 패턴을 투영하는 LCD 프로젝터, 두 대의 CCD 카메라와 두 영상을 받아 처리해주는 두 개의 프레임 그래버(frame grabber), 동기를 맞추는 연결 케이블, 카메라 수평을 고려한 고정 틀로 구성되었다.

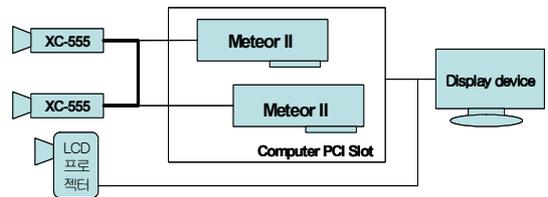


Fig. 2. 스테레오 비전 시스템의 구성

카메라는 SONY XC-555를 이용하였으며 렌즈는 16 mm 렌즈를 사용하였다. SONY XC-555 카메라의 경우 작은 외형(22 x 22 x 75 mm)에 비해 대형 CCD (1/2 CCD)을 사용하여 왜곡을 최소화 하면서 받아들이는 광양이 많아 영상해석에 도움이 된다. 16 mm 렌즈는 100 cm 거리의 모델 측정 시 적절한 화각을 고려하여 선택하였다.

모델영상을 컴퓨터 메모리에 저장하기 위해서는 카메라의 아날로그 신호를 디지털 신호로 바꾸어 주는 프레임 그래버가 필요하다. 본 연구에서는 Meteor-II/Standard 보드를 사용하였다[11]. 또한 두 대의 카메라에서 들어오는 영상을 동시에 촬영하기 위해 프레임 그래버로 들어오는 영상의 동기를 맞추어야 한다. 이를 위해 카메라 사이에서 동기신호를 맞추어주는 연결 케이블을 사용하여 Trigger 역할을 하도록 제작하였다. 스테레오 비전 시스템의 외관은 에피폴라(epipolar) 제약조건을 최소화하기 위해 카메라의 수평을 최대한 고려하였다.

카메라 모델은 두 카메라가 평행하게 배치되어 광축이 나란한 평행 카메라 모델[6]을 사용하였다. 이 모델은 두 카메라의 광축이 서로 평행하기 때문에 한 장면에 대해 보다 많은 양의 일치 화소를 얻기 힘든 단점이 있지만, 복잡한 계산과 기하학적 변형을 피할 수 있는 장점을 가지고 있다. 카메라 렌즈 간의 거리가 멀어질수록 좌우 영상의 기하학적 변형은 거의 없지만 대응점의 위치가 상대적으로 크게 멀어지는 특징도 있다.

카메라 사이의 간격에 따라 가림 현상이나 대응점을

찾는 시간 차이가 많이 발생한다. 카메라 사이의 간격은 사람의 두 눈 사이의 거리의 평균값(6.5 cm)과 비슷한 6 cm로 설정하였다. 카메라 사이의 거리 또한 모델의 3차원 거리를 측정하는데 여러 가지 변수로 작용한다.

두 영상에서 대응점을 찾는데 도움을 주기 위해 사용한 랜덤 패턴은 임의의 점들이나 무늬를 여러 가지 방법으로 제작하여 교육용 LCD 프로젝터를 이용하여 물체에 투영하였다.

4. 3차원 형상 측정

4.1 측정 대상물 선정

본 연구에서는 가로, 세로 20~90 cm 정도 크기의 부품이나 캐릭터 디자인에 이용될 물체들을 측정 대상으로 선정하였다. 스테레오 비전의 제약 상 빛의 반사에 민감하거나, 유리나 같이 투과성이 있는 모델은 피하고, 석고상이나 나무 등의 재질로 된 모델을 선정하였다. 측정 거리는 100 cm 정도의 거리에서 측정하였다.

4.2 카메라 보정

카메라 보정(camera calibration)은 로봇 비전이나 스테레오 비전 등의 컴퓨터 비전이나 광학 분야에서는 필수적인 단계이다. 카메라 보정은 2차원 평면의 점이 실제 3차원의 어떤 점과 대응되는가를 알아내는 과정에서 사용되는 내부 인자(intrinsic parameters)와 외부 인자(extern parameters)를 찾는 과정이다[4-6].

보정 방법에는 형태를 이미 알고 있는 패턴을 놓고 그것을 관측함으로써 교정을 수행하는 방법이 있으며, 이와는 달리 미리 알고 있는 형태를 놓지 않고 형태를 모르는 세계를 관측함으로써 보정을 수행하는 방법이 있다. 본 연구에서는 격자무늬의 체스 판 패턴을 이용한 전자의 방법을 사용하였다. 내부 변수로는 Focal length(fc), Principal point(cc), Skew coefficient(alpha_c), Distortions(kc)의 4가지가 있다[4,5].

4.3 스테레오 영상 획득

인간의 시각 체계는 서로 다른 위치에서 획득된 두 영상을 적절히 매칭시켜 거리 정보를 얻는 것으로 알려져 있다. 스테레오 비전(stereo vision)은 인간 시각 체계의 거리 추출 능력을 자동화하기 위한 컴퓨터 비전 분야 중 하나이다[6]. 이 방법은 초음파와 레이저를 광원으로 사용하여 빛의 비행시간과 속도의 함수로 거리를 측정하는 것보다 간단하며 실제 응용환경의 제약에 영향을 덜 받는다는 장점 때문에 의료 영상, 공장 자동화 및 지도 제작에 널리 이용되고 있다.

거리 정보를 얻기 위한 기본 단계는 영상 획득, 영상 보정(image rectification), 스테레오 매칭(stereo matching), 변위(disparity) 추정, 변위로부터의 거리계산 순으로 이루어진다. CCD 카메라로 촬영된 영상은 비구면 렌즈를 통해서 사각의 CCD로 상이 대응되므로, 영상 왜곡이 발생한다. 이런 왜곡된 영상을 카메라 보정을 통해 얻어진 내부 인자를 이용하여 영상을 펴주는 영상보정 과정을 거치게 된다.

본 연구에서는 각 영상에서의 밝기균등과 배경 분리

를 위해 관심영역(ROI) 이외의 부분을 제거하는 마스크를 사용하였다. ROI 마스크는 패턴을 투영하지 않은 영상을 이미지 처리를 통해 대상 물체 부분만을 검출하였다. 이 마스크의 이용은 측정 작업이 한 번 더 필요로 하지만 스테레오 매칭 시간을 줄이고 양 쪽 이미지에서의 명함 차이를 보정함으로써 정확한 대응점을 찾도록 도와준다. 특히 3차원 정합(registration) 작업 중 배경에 의한 노이즈를 없애주므로 정합 작업을 효율적으로 수행할 수 있다.

4.4 영역 기반 스테레오 매칭

영역 기반 스테레오 매칭(area-based stereo matching)은 한 영상에서 특징을 포함한 일정 영역의 영상 블록을 가지고 다른 영상과 상관관계(correlation)를 이용하여 대응되는 영상블록을 찾는 방법이다[6-8]. 두 영상의 화소의 밝기 값이 직접 매칭에 사용되므로 매칭에 사용되는 화소들의 특징 변화에 아주 민감하다. 이는 영상의 화소 값에 근거함으로써 계산이 간단하지만 계산시간이 많이 소요될 뿐 아니라 영상의 기하학적 왜곡이나 명암대비 변화, 얼룩, 잡음 등에 상당히 취약하며 특히 크기변화 및 회전이 존재하는 영상에서는 적용하기 어려운 단점이 있다.

영역 기반의 매칭은 주로 블록 단위로 비교하여 매칭점을 찾는 블록 매칭 형태이므로 블록의 창 크기는 매우 중요하다. 블록 크기로 3x3, 5x5, 7x7, 9x9, 11x11을 주로 사용하며 블록의 크기가 너무 작으면 잡음에 민감하고 반면에 너무 크면 깊이가 불연속점을 쉽게 놓치게 된다.

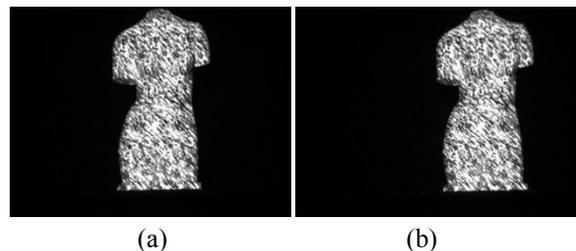
본 연구에서는 다음 식에 나타난 SAD(Sum of Absolute Differences) 알고리즘을 사용하여 두 영상간의 대응점을 구하였다[6].

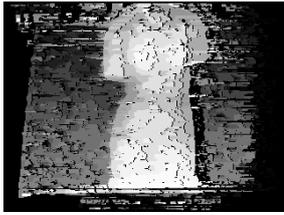
$$\min \sum_{i=-\frac{m}{2}}^{\frac{m}{2}} \sum_{j=-\frac{m}{2}}^{\frac{m}{2}} |I_R[x+i][y+j] - I_L[x+i+d][y+j]|$$

d : disparity, m : 비교 창의 크기

I_R, I_L : 오른쪽과 왼쪽의 영상

Disparity 범위는 100 cm 정도의 거리에서 640x480 영상으로 측정을 실시하였으므로 disparity min 과 max 는 30 ~ 170의 범위로 설정 하였다. 그림 3은 스테레오 영상과 이에 대한 변위 맵을 보여준다.





(c)

그림 3. 스테레오 영상과 disparity : (a) 우측영상(b) 좌측 영상 (c) disparity map

4.5 랜덤 패턴 투영

영역 기반 스테레오 매칭의 경우, 좌우 영상에 대한 일치점은 블록의 명암의 차로 구해진다. 때문에 표면에 텍스처가 균일하거나 단조로울 경우 매칭률이 떨어진다. 이를 극복하기 위해서 기존 연구에서는 복잡한 배경이나 표면의 텍스처가 어지러운 물체를 선택하였다. 본 연구에서는 매칭률을 높이기 위한 방법으로 그림 4에서와 같은 랜덤한 무늬를 생성하여 LCD 프로젝터를 이용하여 대상 물체에 투영하였다. 이는 측정하려는 대상의 텍스처가 없거나 단순한 물체에서도 매칭률을 높일 수 있다. 균일한 패턴의 경우 매칭 시 일정한 규칙의 반복으로 매칭 점이 여러 개 발생하여 매칭에 어려움이 발생되므로, 일정한 규칙성이 없는 랜덤한 패턴이 일정한 창 크기의 밝기 값을 비교하는 영역 기반 매칭 기법에 유용하다.

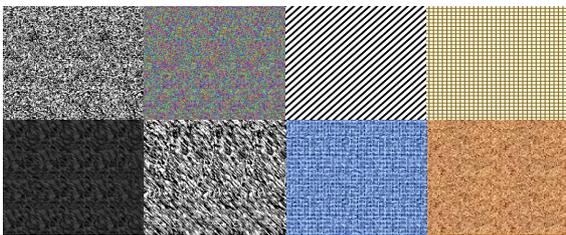


그림 4. 여러 가지 투영 패턴

5. 측정 데이터의 정합

서로 다른 방향에서 측정된 데이터들은 각자의 좌표계에서 정의되어 있다. 각각의 좌표계를 서로 공통된 부분을 중심으로 하나의 좌표계로 정의하여 측정 데이터들을 정렬하는 작업을 3차원 정합(registration)이라 한다 [2].

본 연구에서는 가장 일반적인 정합 방법인 Besl과 McKay에 의해서 제안된 ICP 알고리즘을 사용하였다 [3,15]. ICP 알고리즘에서는 쿼터니언(quaternion)을 이용하여, 한 영상은(모델영상) 표면 조각을 다른 한 영상에서는(데이터영상) 각각의 점을 데이터로 하고, 기준 영상에(모델영상) 대해 정합시키고자 하는 다른 한 영상을(데이터영상) 평행이동 및 회전시킨 후, 가장 가까운 점을 찾아 이로부터 평행 이동 값과 회전 값을 구하여 데이터영상을 이동시키게 된다. 이후 이 과정을 반복적으로 적용시켜, 더 이상 이동이 없는 때 정합을 완료시킨다.

스테레오 비전 시스템으로 측정된 데이터는 비접촉 측정기의 단점인 복잡한 형상에서의 가림 현상이나 측정 데이터의 부정확성 및 잡음 등을 포함하고 있다. 가림 현상의 최소화나 정확성 향상을 위해 같은 방향의 측정이더라도 최대 겹침을 고려하여 여러 번의 측정이 수행 되어야 한다. 측정 영상의 증가는 정합 작업 시간에 많은 영향을 미친다. 정합 과정은 상용 프로그램인 INUS Technology의 RapidForm 2004를 사용하였다. 그림 5는 RapidForm을 사용하여 짚구 모형에 대해 측정된 데이터들의 정합 예를 보여준다.

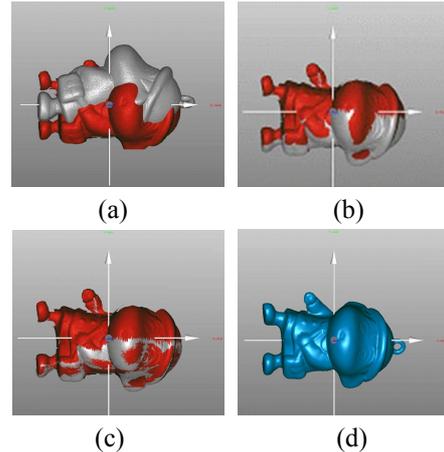


그림 5. 데이터 정합 과정 : (a) 데이터 정렬 (b) 초기 정합 (c) 반복 정합 (d) 정합완료

측정된 각각의 데이터들을 점 데이터 형태에서 1차적으로 편집을 한다. 이는 삼각망을 형성한 후 필요 없는 영역을 잘라내는 것 보다 자유스럽게 잘라 낼 수 있으며, 특히 삼각망 생성 때 부드러운 표면을 생성 시키는 데 유용하다. 물체의 필요 없는 경계 면을 잘라 낼 때에는 자르려 하는 영역보다 조금 더 여유를 주고 많이 잘라 낸다. 이는 정합 작업 때 다른 부분의 데이터들과 부드럽게 연결하는데 도움을 준다. 편집한 데이터를 가지고 삼각망을 생성한 후 공통된 부분을 중심으로 3점 정합을 하였다. 자동 정합에 비해 수작업이 필요 하지만 정확하게 정합 할 수 있다는 장점이 있다. 한 좌표로 데이터를 정렬한 다음, 최종 병합(merging) 작업을 수행한다. 마지막으로 정합한 데이터를 가지고 스무딩(smoothing)과 삼각망 편집을 수행하여 더욱 부드러운 삼각망을 만든다.

6. 실험 결과

지금까지 설명한 스테레오 비전 시스템 기반 3차원 기하 모델 생성 방안을 이용하여 비너스 석고상에 대한 3차원 기하모델을 생성하였다. 실험을 통해 스테레오 비전 시스템을 이용한 형상 측정에서 랜덤 패턴의 종류가 결과 영상의 품질에 큰 영향을 줌을 확인했다. 그림 6은 4가지 랜덤 패턴 투영을 이용한 스테레오 비전을 통해 얻어진 3차원 데이터들을 보여준다.

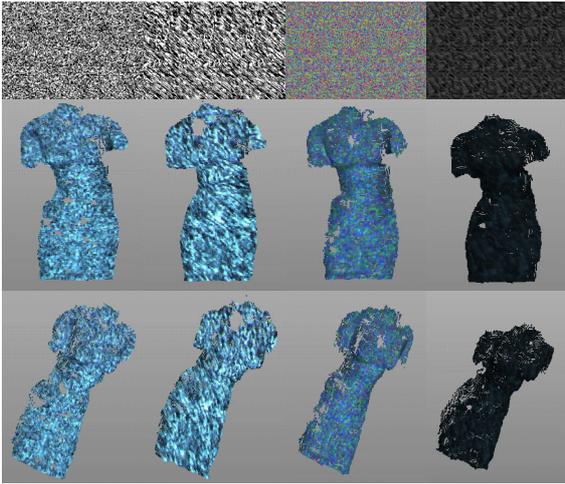


그림 6. 투영 패턴 종류에 따른 3차원 측정 결과

각 패턴 중 그림 6(b)와 6(d)에서 사용된 무늬 모양의 랜덤 패턴이 그림 6(a)와 6(c)에서 사용된 점 형태의 랜덤 패턴보다 높은 매칭률을 가져다 주었으며, 그림 6(b)의 빗살 무늬와 그림 6(c)의 컬러 무늬가 그림 6(a)의 무늬보다 더 정확한 매칭 결과를 가져다 주었다. 그림 7은 그림 6(c)의 컬러의 점 랜덤 무늬를 비너스 석고상에 투영한 후, 8가지 방향에서의 스테레오 비전 측정을 통해 각 얻어진 3차원 데이터들을 나타낸다.

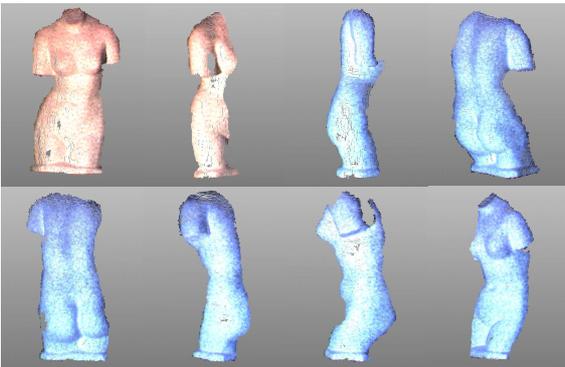


그림 7. 각 방향에서 비너스 석고상 측정

각 방향에서 측정된 데이터들은 3차원 점군으로 이루어져 있다. 이 점군들을 연결하여 삼각망을 생성하게 되는데 삼각망 생성 전에 각 데이터를 필요에 맞게 편집하는 작업이 필요로 하다. 특히 굴곡이 심한 부분에서의 측정 오차가 크기 때문에 이 부분들을 제거 해 주고, 필요시 부분 측정을 시행한다. 그림 8은 측정된 점군들을 이용하여 삼각망을 생성한 결과를 나타낸다.

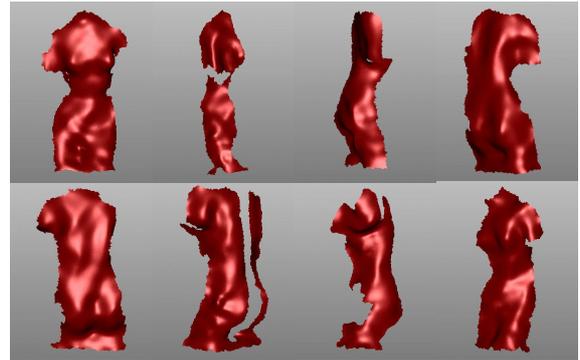


그림 8. 각 점군의 삼각망 생성 및 편집

삼각망이 생성된 후 각 데이터들을 하나의 좌표계로 이동시켜주는 정합 작업을 수행한다. 두 개의 데이터 중 일치하는 부분을 중심으로 조금씩 이동하여 최적 정합이 이루어 질 때까지 반복한다. 그림 9는 8개의 비너스 데이터를 하나의 좌표계로 정합시킨 결과를 보여준다.

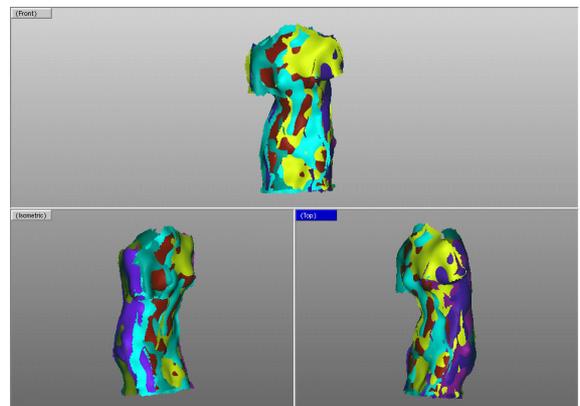


그림 9. 비너스 석고상 측정데이터의 정합 결과

정합된 삼각망들을 하나의 삼각망으로 만드는 병합 작업을 수행한다. 병합 작업 중 홀(hole) 이나 경계선 부분에서의 노이즈 등이 발생하게 되며, 이를 제거하기 위해 홀 채우기나 거친 표면 제거 작업등 부수적인 작업을 거치게 된다. 그림 10은 비너스 석고상의 실제 이미지를 보여준다. 그림 11는 비너스 석고상에 대한 8개 삼각망들을 하나의 삼각망으로 병합한 결과를 보여 주고 있다.



그림 10. 비너스 석고상의 실제 이미지

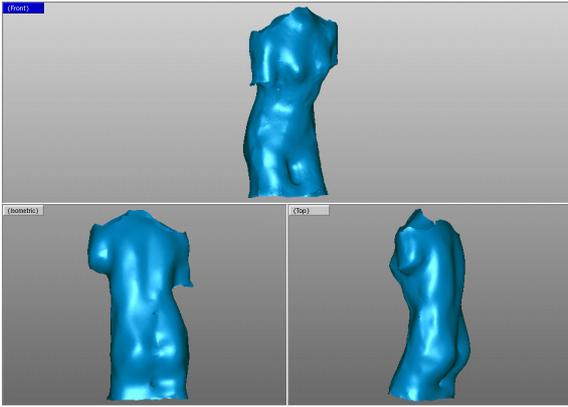


그림 11. 병합된 최종 삼각망

7. 결론

본 연구는 랜덤 패턴 투영을 이용한 스테레오 비전 시스템 기반 3차원 기하모델 생성에 대해 설명하였다. 그리고, 측정 시스템 구축과 측정 데이터 획득/처리/정합/병합을 통한 3차원 형상모델 생성 과정에서 필요한 고려사항들을 소개하였다. 본 연구에서는 빔 프로젝터로 물체 표면에 랜덤 무늬를 투영함으로써 일치점을 효율적으로 찾는 방안을 제시하였다. 이는 물체의 표면에 텍스처가 없거나 단순한 모델에서도 스테레오 비전을 효과적으로 적용할 수 있다. 결과 기하모델로서 삼각형들의 집합인 삼각망(triangular mesh)이 생성된다. 추후, 구조화된 패턴을 물체에 투영하여 얻어진 영상을 이용함으로써 보다 정확한 3차원 기하모델을 획득하고, 정확한 삼각망 생성 및 자동 정합 방안을 연구 개발하고자 한다.

References

[1] B. L. Curless, "New methods for surface reconstruction from range images", PhD Thesis, Stanford University, June, 1997.
 [2] L. G. Brown, "A survey of image registration techniques", ACM computing Surveys, Vol. 24, No. 4, pp. 325-376, 1992.
 [3] P. Besl and N. McKay, "A method for registration of 3-D shapes", IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell. Vol. 14, No. 2, pp. 239-256, 1992.
 [4] B. Jean Yves and P. Pietro, "Camera calibration from points and lines in dual-space geometry", European conference on computer vision, 1998.
 [5] <http://vision.caltech.edu/bougueti/>
 [6] X. Gang and T. Saburo, "3차원 비전", 대영사, 2000.
 [7] T. Kanade and M. Okutomi, "A stereo matching algorithm with an adaptive window: theory and experiment", IEEE Trans. On Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 16, pp. 920-932, 1994.
 [8] A. Fusiello, V. Roberto and E. Trucco, "Efficient stereo with multiple windowing", CVPR, pp.

858-863, 1997.
 [9] B. Wolfgang, H. Guide and M. Andreas, S. Mirko, "3D scanning software : an introduction", handout.
 [10] <http://www.scanning.fh-mainz.de>
 [11] Matrox Meteor-II / Standard reference, Matrox Electronic Systems LTD. 2003.
 [12] G. Farin, "Curves and surfaces for CAGD", Morgan Kaufman, New York, 2002.
 [13] J. Hoschek and D. Lasser, "Fundamentals of computer aided geometric design", A K Peters, London, 1993.
 [14] L. Piegl and W. Tiller, "The NURBS book", Springer-Verlag, New York, 1995.
 [15] Z. Zhang, "Iterative point matching for registration of gree-form curves and surfaces", Int'l. J. of Comp. Vision, Vol. 13, No. 2, pp. 119-152, 1994.
 [16] R. Gonzalez and R. Woods, "Digital Image Processing", Addison-Wesley, 2001.