

# 레이저 비전 기술을 이용한 물체의 3D 모델 재구성 방법에 관한 연구

## A Study on Three-Dimensional Model Reconstruction Based on Laser-Vision Technology

응후쿠옹<sup>1</sup>, 이병룡<sup>1,✉</sup>  
Huu Cuong Nguyen<sup>1</sup> and Byung Ryong Lee<sup>1,✉</sup>

<sup>1</sup> 울산대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, University of Ulsan)  
✉ Corresponding author: brlee@ulsan.ac.kr, Tel: +82-52-259-2861

Manuscript received: 2015.2.9. / Revised: 2015.4.28. / Accepted: 2015.5.20.

*In this study, we proposed a three-dimensional (3D) scanning system based on laser-vision technique and rotary mechanism for automatic 3D model reconstruction. The proposed scanning system consists of a laser projector, a camera, and a turntable. For laser-camera calibration a new and simple method was proposed. 3D point cloud data of the surface of scanned object was fully collected by integrating extracted laser profiles, which were extracted from laser stripe images, corresponding to rotary angles of the rotary mechanism. The obscured laser profile problem was also solved by adding an addition camera at another viewpoint. From collected 3D point cloud data, the 3D model of the scanned object was reconstructed based on facet-representation. The reconstructed 3D models showed effectiveness and the applicability of the proposed 3D scanning system to 3D model-based applications.*

KEYWORDS: Laser-Vision technology (레이저 비전 기술), 3D model reconstruction (3D 모델 재구성), Laser-Camera calibration (레이저 카메라 교정), Rotary mechanism (회전기구), Point cloud data (점군집 데이터)

### 1. 서론

디지털 3D 모델은 실제 물체의 형상을 수치적인 3D 데이터로 표현하는 것이다. 오늘날, 3D 모델의 적용분야는 매우 광범위하고, 더욱이 3D 그래픽 장치의 성능향상과 컴퓨터와 같은 계산장치의 가격하락으로 3D 모델 관련산업은 더욱 성장하고 있는 추세이다.

가상박물관<sup>1</sup>이 등장하여 귀중한 문화재를 파손

과 도난의 위험없이 전시할 수 있고, 또한 대형물의 문화재도 축소된 모델로 비교적 적은 공간에서도 전시가 가능하다. 또한 신체나 산업제품의 3D 모델<sup>2,3</sup>을 활용한 분야로는 패션디자인, 생산제품의 디자인 및 개발, 그리고 마케팅 산업 등을 들 수도 있으며, 건축 디자인과 역설계(reverse engineering)<sup>4,5</sup> 등의 분야에도 적용할 수 있다.

스캐닝이란 물체의 기하학적인 형상을 전자동 혹은 반자동적인 방법으로 물체의 3D 모델을 구하

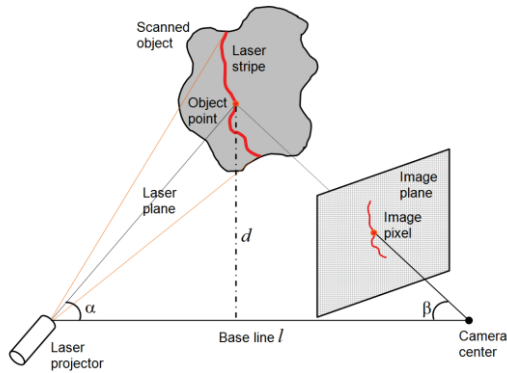


Fig. 1 Triangulation-Based laser-vision

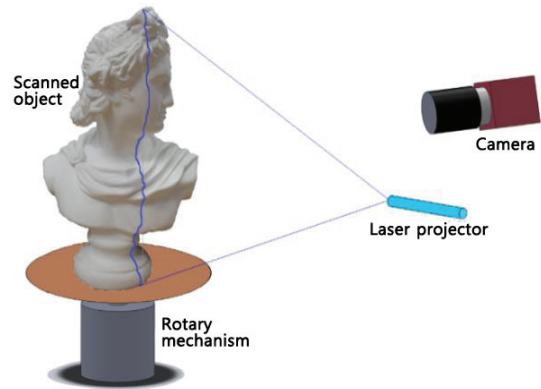


Fig. 2 3D laser-vision scanning system

는 과정을 말한다. 일반적으로 스캔된 데이터는 점군집(point cloud) 데이터라고 불리는데, 이 것은 각각의 스캔된 점 데이터는 3차원 공간상에서 하나의 위치좌표 값을 가지기 때문이다.

3D 스캐닝 시스템은 스캐닝을 하는 방법<sup>6</sup>에 따라 구분될 수 있다. 광학적 방법<sup>7,8</sup>은 포토그래피 원리(photographic principle)를 이용하고, 초음파방식<sup>9,10</sup>은 스캐닝을 하는데 초음파 파형(wave)을 이용하며, 그 외에도 RTG 방사선을 이용하는 x-ray 방법,<sup>11,12</sup> 그리고 삼각법(triangulation principle)을 이용하는 레이저방법<sup>13,14</sup> 등이 있다.

그 중에서 삼각법은 기준선(base line)의 양 끝 단 점의 위치를 알고 있으면 기준선으로부터 한 점까지의 거리를 계산할 수 있는 방법을 사용한다. Fig. 1은 한 개의 레이저 프로젝터와 한 개의 카메라를 사용한 형태로 삼각법을 이용할 수 있는 전형적인 레이저-비전 장치 시스템이다.

레이저프로젝터는 물체를 스캔하기 위하여 물체의 표면에 레이저 라인을 주사하게 된다. 이 때 물체의 표면에 형성된 레이저 띠(laser stripe)가 카메라에 의해 획득된다. 레이저 띠의 각 점들은 영상화면 상의 각 픽셀에 해당된다.

Fig. 1에서 기준선의 길이 \$l\$과 두 사이각 \$\alpha, \beta\$를 알고 있으면 삼각법에 의하여 기준선으로부터 목표점까지의 거리 \$d\$는 다음과 같이 쉽게 구할 수 있다.

$$d = \frac{l \sin \alpha \sin \beta}{\sin(\alpha + \beta)} \quad (1)$$

본 연구에서는 삼각법을 이용할 수 있는 레이저 비전시스템과 물체를 회전하여 스캔할 수 있는

회전기구를 사용하였다. 따라서, 스캔된 물체의 표면에 대한 모든 점군집(point cloud) 데이터를 수집할 수 있다.

회전기구가 회전함에 따라 각각의 회전각도에 대해 물체표면의 레이저 프로파일(laser profile)이 획득되고, 획득된 레이저 프로파일들은 회전각도 정보와 함께 저장된다. 그리하여 물체표면 전체에 대한 3D 점군집 데이터가 완성된다.

이러한 3D 점군집 데이터를 이용하여 스캔된 물체의 3D 모델을 재구성(reconstruction)할 수 있다. 그리고, 재구성된 3D 모델은 3D 프린터로 출력될 수 있거나 다른 다양한 목적으로 사용될 수 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같이 정리되어 있다. 2장에서는 제안된 레이저 비전 기반의 3D 스캐닝 시스템의 구조 및 원리를 설명하였고, 3장에서는 레이저 비전 시스템의 캘리브레이션(calibration) 과정을 설명하였다. 4장에서는 레이저 프로파일의 획득 및 처리과정에 대한 설명을 하였고, 5장에서는 3D 점군집 데이터의 획득 및 3D 모델 재구성(reconstruction) 방법을 제안하였다. 끝으로 6장에서 결론을 정리하였다.

## 2. 제안된 3D 스캐닝 시스템

본 논문에서 제안한 레이저 비전 3D 스캐닝 시스템은 Fig. 2에서 보는 바와 같이 레이저 프로젝터, 카메라, 회전기구로 3개의 모듈로 구성되어 있다. 레이저프로젝터는 스캔하고자 하는 물체의 표면에 레이저 띠를 주사하는데 사용된다.

카메라모듈은 초점조절렌즈와 CMOS 영상센서를 가진 GigE(Gigabit Ethernet) 고속카메라를 포함

하고 있다.<sup>15</sup>

사용된 CMOS 영상센서의 픽셀 사이즈는 1312 x 1082 픽셀이고, 그레이 영상(gray image)을 제공한다. GigE 카메라는 100m 정도 되는 LAN 케이블의 거리를 초당 135 프레임까지 고속으로 영상을 전송할 수 있다. 회전기구는 스캔하고자 하는 물체를 360도 회전시켜서 물체의 전체 표면에 대한 3D 점군집 데이터를 형성할 수 있게 한다.

회전기구가 일정한 각도로 회전할 때마다 레이저 띠에 의해 형성된 점군집 데이터는 LAN 카드를 통해서 컴퓨터로 전송된다.

### 3. 캘리브레이션

지금까지 삼각법과 좌표변환을 기반으로 하는 레이저 비전 캘리브레이션 방법들이 많이 연구되어 왔다.<sup>16-19</sup> 하지만, 대부분의 방법들은 복잡하고 각 부품요소 즉, 카메라, 레이저 프로젝터 및 회전기구의 위치와 상대각도를 정확하게 계산해야 하는 단점들을 가지고 있다.

본 연구에서는 영상평면(image plane)과 레이저 평면(laser plane) 좌표계 사이의 상대위치값을 캘리브레이션 물체(calibration object)를 이용하여 바로 구하는 방법을 제안하였다. 기존의 방법들이 캘리브레이션을 위해 여러 각도에서 얻은 영상이 필요하지만, 본 연구에서 제안한 방법은 한 번의 영상으로 캘리브레이션이 이루어진다는 면에서 차별성이 부각된다. 캘리브레이션 물체는 체스보드(chess board) 모양의 격자를 사용하였다.

Fig. 3은 레이저 비전 시스템과 체스보드를 사용하여 캘리브레이션을 수행하는 방법을 보여주는 그림이다. 제안된 캘리브레이션 방법은 레이저 프로젝터가 카메라 장치와 일정한 각도를 이루고 같은 수평면에 놓이도록 하였다.

레이저 띠(laser stripe)는 레이저 평면과 스캔되는 물체와의 교차선이므로 생성되는 레이저 띠의 모습은 스캔되는 물체 표면의 곡선을 나타내게 된다. 체스보드가 레이저 평면과 만나게 되면 획득되는 체스보드의 영상 또한 영상좌표계 상에 나타나게 된다.

3D 화면으로부터 2D 영상화면으로 투영되는 효과에 의해 체스보드의 영상은 Fig. 4와 같이 왜곡(distortion)이 발생하게 된다.

그러므로, 본 연구에서는 이러한 왜곡을 정렬(rectification)하기 위한 캘리브레이션 방법을 제안

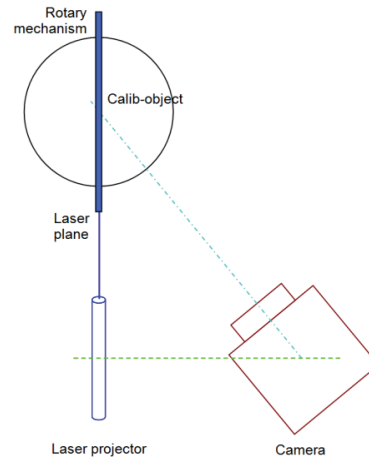


Fig. 3 Direct calibration method

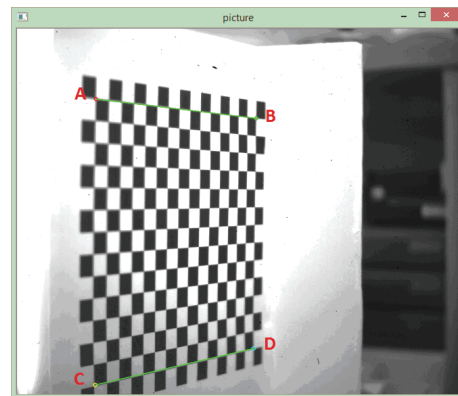


Fig. 4 Chessboard image and define lines for rectification

하였다. 체스보드 영상으로부터 발견되는 코너점들로부터 4개의 코너점들이 선택된다. 즉, 좌상점(left-top), 우상점(right-top), 좌하점(left-bottom), 우하점(right-bottom) 들이며, 이 들 점을 각각 A, B, C, D 점으로 나타내었다.

높이정렬(height rectification)을 위하여 2개의 수평선 ( $l_1, l_2$ ) 이 정의되며, 이 두 선은 Fig. 4에서 보는 바와 같이 각각 A-B 및 C-D 점을 연결하는 선이다.  $u$  와  $v$  를 영상화면의 가로축과 세로축을 나타내는 픽셀 좌표축이라고 정의하면, 점 A로부터 점 B까지의 수직 픽셀좌표축은 다음과 같은 식에 의해 교정될 수 있다.

$$v_{correct} = \frac{v - v_{init}(u)}{v_{final}(u) - v_{init}(u)} \cdot H \quad (2)$$

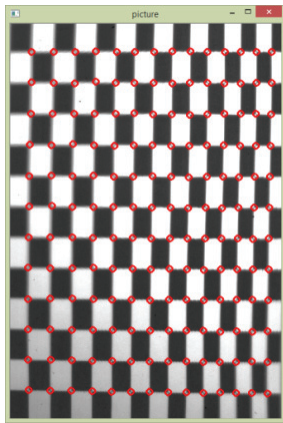


Fig. 5 Rectified chessboard image and its detected corners

위 식에서  $v_{ini}(u)$ 와  $v_{final}(u)$ 는 각 영상 칼럼에서 수직 픽셀좌표축의 시작과 끝점을 나타낸다. 즉, 직선  $l_1$  과  $l_2$  사이의 거리를 나타낸다.  $H$  는 사다리꼴 모양  $ABCD$ 에서 최대높이를 나타낸다.

폭 정렬(width rectification) 또한 높이정렬과 같은 방법으로 수행될 수 있다. 2개의 수직선 ( $l_3, l_4$ ) 는 각각  $A-C$  및  $B-D$  점을 연결하는 선으로 정의된다. 점  $A$ 로부터 점  $C$ 까지의 수평 픽셀좌표축은 다음과 같은 식에 의해 교정될 수 있다.

$$u_{correct} = \frac{u - u_{ini}(v)}{u_{final}(v) - u_{ini}(v)} \cdot W \quad (3)$$

위 식에서  $u_{ini}(v)$  and  $u_{final}(v)$ 는 각 영상 칼럼에서 수평 픽셀좌표축의 시작과 끝점을 나타낸다. 즉, 두 직선  $l_3$  와  $l_4$  사이의 거리를 나타낸다.  $W$ 는 사다리꼴 모양  $ABCD$ 에서 최대폭을 나타낸다. Fig. 5는 위의 식들을 Fig. 4에 적용하여 체스보드 영상을 정렬한 결과를 나타낸다.

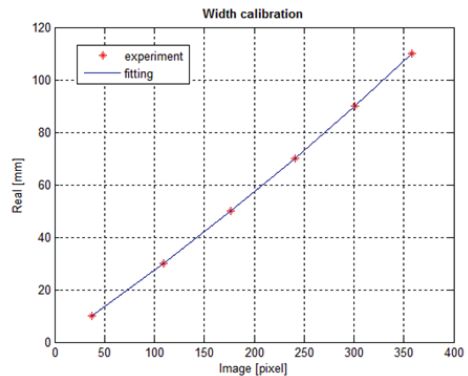
실제로 알고 있는 체스보드의 사각격자의 치수와, 정렬된 체스보드의 영상화면에서의 사각격자의 모서리 간의 픽셀거리를 이용하면 영상평면과 레이저 평면에서의 치수변화에 의한 스케일(scale) 값은 계산할 수 있다.

직접 캘리브레이션을 하기 위한 데이터 셋을 구성하기 위하여 체스보드의 다양한 사각격자의 모서리와 영상화면에서의 사각격자 사이의 치수를 Table 1과 같이 구하였다.

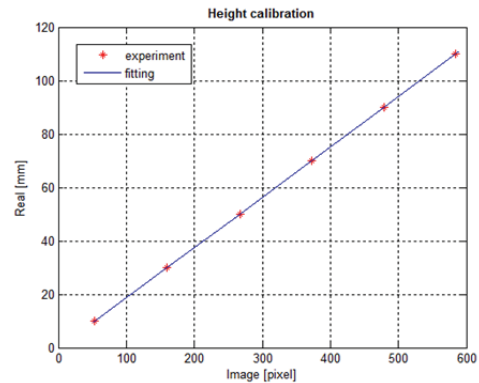
다음 데이터로부터 실제 치수와 영상화면에서의 치수관계는 다음과 같은 다항식에 의해 구해진다.

Table 1 Experimental data for calibration

No. squares	Image width [pixel]	Real width [mm]	Image height [pixel]	Real height [mm]
1	37.513	10	53.482	10
3	109.510	30	160.153	30
5	176.854	50	266.966	50
7	240.666	70	372.205	70
9	300.887	90	478.669	90
11	357.777	110	583.750	110



(a) Width



(b) Height

Fig. 6 Results of width and height polynomial functions fitting

$$h = p_0v^3 + p_1v^2 + p_2v + p_3 \quad (4)$$

$$w = q_0u^3 + q_1u^2 + q_2u + q_3 \quad (5)$$

위 식에서  $h$ 와  $w$ 는 체스보드의 실제 높이와 폭을 나타내며,  $v$ 와  $u$ 는 영상화면에서 체스보드 사각격자의 수직 및 수평거리를 나타낸다.  $p_i$  와  $q_i$  ( $i = 0, 1, 2, 3$ )는 다항식의 계수를 나타낸다.

Figs. 6(a)와 6(b)는 각각 폭과 높이의 영상값과 실제값의 관계를 나타낸 그림이다. 획득된 캘리브레이션 데이터에 기반한 다항식 피팅 방법을 사용하면, 다항식의 각 계수들은 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned}
 p_0 &= -1.0263e-09; & p_1 &= 3.7772e-06; \\
 p_2 &= 0.1865; & p_3 &= 0.0146 \\
 q_0 &= 5.6793e-08; & q_1 &= 1.0776e-04; \\
 q_2 &= 0.2615; & q_3 &= 0.0253
 \end{aligned}$$

**4. 레이저 프로파일 처리**

**4.1 레이저 프로파일을 획득**

레이저 띠 영상으로부터 레이저 프로파일을 획득하기 위해 빛강도분포(intensity distribution) 방법을 주로 사용하고 있는데, 예를 들면 면적중심법(center of gravity), 강도분포피팅(intensity distribution fitting), 다중피크탐색(multi-peak detection) 등의 알고리즘이다.<sup>20-22</sup>

레이저 빔을 이용하여 영상처리를 수행하는 과정은 매우 간편하다. 하지만, 스캔하는 물체의 표면이 매우 매끄러워서 빛이 산란하는 경우나 태양 빛과 같이 광원의 조도가 수시로 변하는 경우는 Fig. 7에서 보는 바와 같이 레이저 띠의 영상에 잡음이 많이 발생하게 된다.

점군집 데이터를 수집하는데 있어서 처리시간을 줄이면서도 복원정밀도를 향상하기 위해 본 연구에서는 최대탐색(maximum searching) 알고리즘을 적용하였다. 먼저, 레이저 띠 영상에서 각 픽셀의 밝기강도가 구해진다.

그리고, Fig. 8과 같이 각각의 수평영상(image row)에서 픽셀들의 강도값과 각 픽셀의 위치값이 구해진다. 마지막으로 각각의 레이저 띠에서 최대 밝기강도값(maximum light intensity)을 갖는 픽셀의 위치를 구함으로써 최종 레이저 프로파일이 획득된다.

본 연구에서는 레이저 프로파일의 잡음을 줄이기 위하여 9x9 사이즈의 가우시안 필터(Gaussian filter) 커널을 사용하여 스무딩(smoothing) 과정을 수행 하였다. 잡음처리가 끝난 후의 레이저 프로파일 모습은 Fig. 9와 같다.

**4.2 단속된 레이저 프로파일의 연결**

물체의 형상표면에 굴곡이 심한 경우에 카메라가 레이저 띠의 일부분을 볼 수 없는 경우가 발생



Fig. 7 Laser stripe image

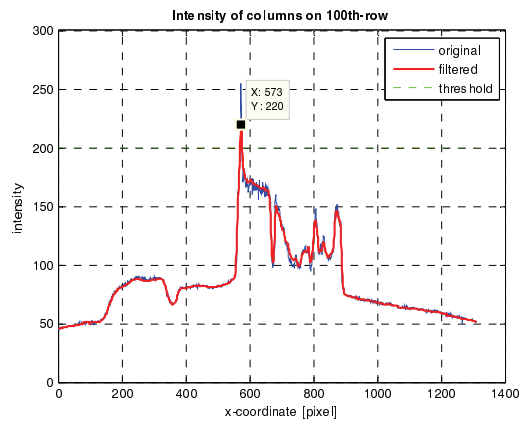


Fig. 8 Intensity distribution of pixels with the 100<sup>th</sup> row

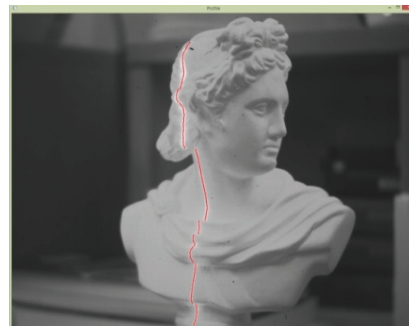


Fig. 9 Extracted profile of a laser stripe

하므로 레이저 프로파일이 Fig. 10과 같이 단속되는 경우가 발생한다.

본 논문에서는 이와 같은 레이저 프로파일의 단속문제를 해결하기 위하여 원래의 시스템에 카메라를 추가적으로 하나 더 설치하였다. 추가적으로 설치된 카메라는 Fig. 11과 같이 원래 카메라에 대칭적인 모습으로 설치되어 원래 카메라가 볼 수



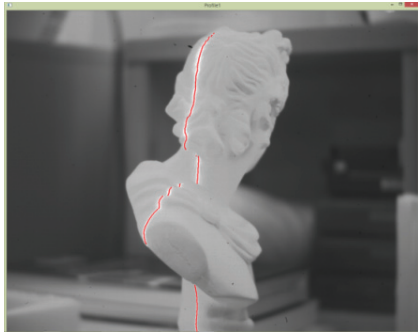


Fig. 10 Obscured laser profile

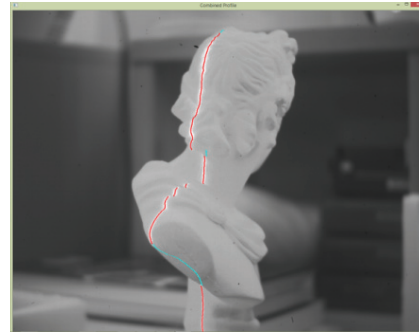


Fig. 13 Recovered laser profile

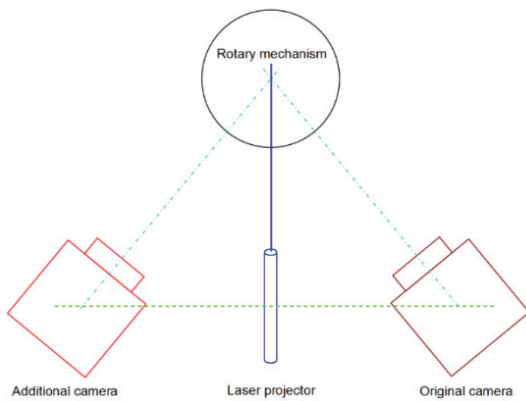


Fig. 11 Adding camera for laser profile recovering

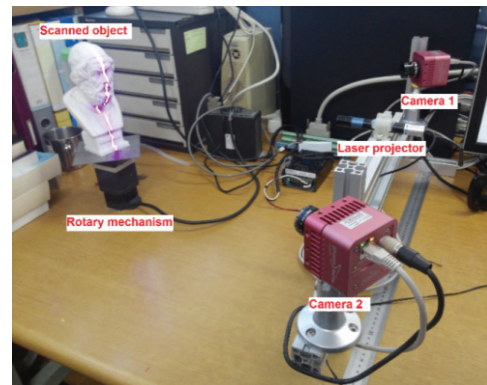


Fig. 14 Laser-Vision-Based 3D scanning system



Fig. 12 Laser profile extracted from additional camera

없는 부분을 쉽게 관측할 수 있다. 따라서, 두 카메라의 영상을 조합하면 레이저 프로파일을 단속 문제를 해결할 수 있다.

추가적으로 설치된 카메라도 원래의 카메라를 캘리브레이션 한 것과 같은 방법으로 캘리브레이션 하면 된다. Fig. 12는 추가적인 카메라에 의해 획득된 레이저 프로파일을 보여주고 있다.

원래 카메라로부터 얻어진 레이저 프로파일의 픽셀좌표를 수직방향으로 탐색한 후, 단속이 된 픽셀들은 추가된 카메라로부터 얻어진 레이저 프로파일에서 대응하는 부분을 끼워 넣어서 Fig. 13과 같이 완전한 레이저 파일을 생성할 수 있다.

### 5. 3D 모델의 재구성

#### 5.1 3D 점군집 데이터의 획득

본 연구에서는 스캔된 물체의 3D 모델을 재구성(reconstruction) 하기 위하여 Fig. 14와 같은 레이저 비전 기반의 3D 스캐닝 시스템을 제작하였다. 스캔되는 물체 전체 표면의 3D 점군집 데이터를 얻기 위하여 스캔용 레이저와 물체를 360도 회전시키는 회전기구를 사용하게 된다.

본 실험에서 공작물에 대한 회전각도는 0.5도 간격이었으며 회전속도는 20 deg/s 이었다. 따라서, 각각의 프로파일 정보를 획득하는 시간은 40ms 이었고, 전체 3D 점군집 데이터를 형성하는 데 약 33초가 소요되었다.

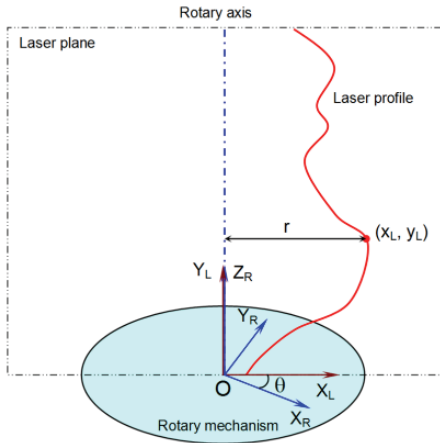


Fig. 15 Coordinate transforming from laser plane into rotary mechanism frames

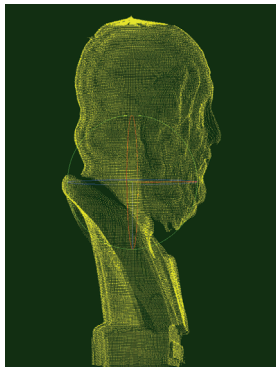


Fig. 16 3D point cloud data

이렇게 하여 얻어진 레이저 프로파일 상의 각 픽셀은 레이저평면 좌표계에 대한 위치값  $(x_L, y_L)$  과 회전기구의 회전각  $(\theta)$  정보를 갖게 된다. 이 파라미터들은 회전기구 좌표계에 대한 값으로 변환된다.

레이저 주사 평면 좌표계  $\{O, X_L, Y_L\}$ 와 회전기구 좌표계  $\{O, X_R, Y_R, Z_R\}$ 는 Fig. 15와 같이 회전기구의 중심에 위치하고 있다. 레이저 평면의  $Y_L$  축과 회전기구의  $Z_R$  축은 같은 방향이다. 따라서, 레이저 평면 좌표계 상의 임의의 점  $(x_L, y_L)$ 에 대한 회전기구 좌표계 상의 대응점은 다음과 같은 좌표변환식을 이용하여 구할 수 있다.

$$\begin{cases} x_r = r \cos \theta \\ y_r = r \sin \theta \\ z_r = y_l \end{cases} \quad (6)$$

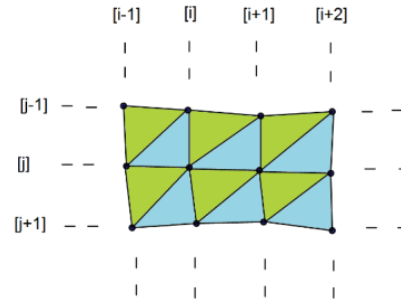


Fig. 17 Facet-Based surface reconstruction

위 식에서  $r = x_l$  을 의미하며 회전축으로부터 레이저평면의 픽셀까지의 거리를 나타낸다. Fig. 16 은 사용된 조각상을 스캔하여 구한 전체 3D 점군집 데이터의 예시이다. Fig. 16에서 수집된 점군집 데이터의 개수는 모두 129,600 (360 rows x 360 columns)개 였다.

### 5.2 3D 모델 재구성

본 연구에서는 수집된 3D 점군집 데이터를 이용하여 면표현법(facet representation) 으로 3D 모델을 재구성하였다. 면표현법에 기반한 모델은 STL (Standard Tessellation Language) 포맷으로 쉽게 변환이 된다. STL 파일은 3D 시스템이나 CAD 시스템에 주로 사용되는 데이터 포맷인데, 대부분의 3D 프린터 시스템도 STL 파일을 사용하여 3D 출력물을 만들어 낸다.

면(facet)은 3D 물체의 표면을 구성하게 되는데, 각각의 면은 물체의 내부와 외부의 경계면을 나타낸다. 이러한 면의 자세(orientation)는 2개의 요소로 정의된다.

먼저, 면에 수직인 방향은 바깥방향으로 향하게 된다. 그리고, 면의 꼭지점들은 바깥방향에서 바라보았을 때를 기준으로 반시계 방향으로 번호를 붙이도록 한다. 본 연구에서 구축한 스캐닝 시스템으로 얻어진 3D 점군집 데이터는 약간 가공된 데이터이며, 점군집의 사이즈는  $M \times N$  이다. 여기서,  $N$ 은 레이저 프로파일의 개수이며,  $M$ 은 각 레이저 프로파일 상의 픽셀 개수이다. Fig. 17은 수집된 3D 점군집 데이터를 이용해서  $i^{\text{th}}$  행과  $j^{\text{th}}$  열 부근의 영역에서 재구성된 물체의 표면 모델을 보여주고 있다.

Fig. 18과 Fig. 19는 스캔용으로 사용된 실체 물체와 스캔 이후에 재구성된 3D 모델의 모습을 보여주고 있다.



Fig. 18 The first reconstructed 3D model



Fig. 19 The second reconstructed 3D model

## 6. 결론

본 논문은 레이저 비전 기반의 3D 스캐닝 시스템을 사용하여 물체의 3D 모델을 자동적으로 재구성하는 방법을 제시하였다. 제안한 스캐닝 시스템은 레이저 프로젝터, 카메라, 그리고 360도 회전 이 가능한 회전기구로 구성되어 있다.

본 논문의 기여 부분은 레이저와 카메라 시스템 간의 캘리브레이션 방법을 새롭게 제안했다는 점이다. 또한 레이저 띠 영상에서 부분적으로 단락이 되는 픽셀 데이터를 효과적으로 복구하는 방법을 제시하였다.

완성된 3D 모델의 정확성은 회전기구의 회전 각 정밀도와 레이저 프로파일을 정확하게 추출하는가에 달려있다. 따라서, 본 연구에서 제안한 알고리즘을 사용하여 획득된 정확한 3D 점군집 데이터는 3차원 측정, 검사 및 역설계공학 등에 유용하게 적용될 수 있다고 본다. 또한, 본 연구에서 획득된 3D 점군집 데이터는 면표현(facet representation)에 의해 3D 모델로 재구성되었고, 이 모델은 쉽게 STL 포맷으로 변환이 가능하여 CAD 소프트웨어 및 3D 프린팅 프로세서에도 쉽게 접목이 가능하다.

## REFERENCES

1. Qi, Y., Cai, S., and Yang, S., "3D Modeling, Codec and Protection in Digital Museum," in: Digital Media and Its Application in Museum & Heritages, Second Workshop on, Pan, Z. and Jia, J., (Eds.), IEEE, pp. 231-236, 2007.
2. Woo, W.-S. and Lee, C.-M., "An Analytical Study on the Preheating Effect of Workpiece with Cylindrical Shape for 3-Dimensional Laser-assisted Milling," J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 32, No. 2, pp.173-178, 2015.
3. Kim, K., Lee, J., Kim, H., Park, J., and Yoon, K., "Laser Scanning Technology for Ultrasonic Horn Location Compensation to Modify Nano-Size GrainM," J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 31, No. 12, pp. 1121-1126, 2014.
4. Xu, H., Hu, Y., Chen, Y., Ma, Z., and Wu, D., "A Novel 3D Surface Modeling Based on Spatial Neighbor Points Coupling in Reverse Engineering," Proc. of the International Conference on Computer Design and Applications, Vol. 5, pp. 59-62, 2010.
5. James, A., Jin, H., and Sequin, C., "Interactive Inverse 3D Modeling," Computer-Aided Design and Applications, Vol. 9, No. 6, pp. 881-900, 2012.
6. Tóth, T. and Živčák, J., "A Comparison of the Outputs of 3D Scanners," Procedia Engineering, Vol. 69, pp. 393-401, 2014.
7. Nguyen, H. C., Ho, E., and Lee, B. R., "Surface Reconstruction from Multi-Views Data Sets Using Stereo Camera and Rotatable Mechanism," Proc. of the International Conference on Mechatronics Technology, pp. 142-145, 2013.
8. Levine, M. D. and Yu, Y. C., "State-of-the-Art of 3D Facial Reconstruction Methods for Face Recognition Based on a Single 2D Training Image Per Person," Pattern Recognition Letters, Vol. 30, No. 10, pp. 908-913, 2009.
9. Nelson, T. R. and Pretorius, D. H., "Three-Dimensional Ultrasound Imaging," Ultrasound in Medicine & Biology, Vol. 24, No. 9, pp. 1243-1270, 1998.
10. Yeom, E., Nam, K.-H., Jin, C., Paeng, D.-G., and Lee, S.-J., "3D Reconstruction of a Carotid Bifurcation from 2D Transversal Ultrasound Images," Ultrasonics, Vol. 54, No. 8, pp. 2184-2192, 2014.



11. Milien, M., Renault-Spilmont, A.-S., Cookson, S. J., Sarrazin, A., and Verdeil, J.-L., "Visualization of the 3D Structure of the Graft Union of Grapevine Using X-Ray Tomography," *Scientia Horticulturae*, Vol. 144, pp. 130-140, 2012.
12. Petković, T., Homan, R., and Lončarić, S., "Real-Time 3D Position Reconstruction of Guidewire for Monoplane X-Ray," *Computerized Medical Imaging and Graphics*, Vol. 38, No. 3, pp. 211-223, 2014.
13. Rütter, H., Chazan, M., Schroeder, R., Neeser, R., Held, C., et al., "Laser Scanning for Conservation and Research of African Cultural Heritage Sites: The Case Study of Wonderwerk Cave, South Africa," *Journal of Archaeological Science*, Vol. 36, No. 9, pp. 1847-1856, 2009.
14. Yang, X., Strahler, A. H., Schaaf, C. B., Jupp, D. L., Yao, T., et al., "Three-Dimensional Forest Reconstruction and Structural Parameter Retrievals Using a Terrestrial Full-Waveform Lidar Instrument (Echidna®)," *Remote Sensing of Environment*, Vol. 135, pp. 36-51, 2013.
15. Photonfocus, "DR1-D1312(IE)-200-G2-8," [http://www.photonfocus.com/products/camerafinder/camera/?no\\_cache=1&prid=59](http://www.photonfocus.com/products/camerafinder/camera/?no_cache=1&prid=59) (Accessed 10 June 2015)
16. Zhang, J. and Djordjevich, A., "Study on Laser Stripe Sensor," *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 72, No. 3, pp. 224-228, 1999.
17. Xu, D., Wang, L., Tu, Z., and Tan, M., "Hybrid Visual Servoing Control For Robotic Arc Welding Based on Structured Light Vision," *Acta Automatica Sinica*, Vol. 31, No. 4, pp. 596-605, 2005.
18. Sun, J., Zhang, J., Liu, Z., and Zhang, G., "A Vision Measurement Model of Laser Displacement Sensor and Its Calibration Method," *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 51, No. 12, pp. 1344-1352, 2013.
19. Niola, V., Rossi, C., Savino, S., and Strano, S., "A Method for the Calibration of a 3-D Laser Scanner," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 27, No. 2, pp. 479-484, 2011.
20. Usamentiaga, R., Molleda, J., and García, D. F., "Fast and Robust Laser Stripe Extraction for 3D Reconstruction in Industrial Environments," *Machine Vision and Applications*, Vol. 23, No. 1, pp. 179-196, 2012.
21. Jin, Y., Zhang, L., Wu, C., and Zhu, Z., "Detection of 3D Curve for Shoe Sole Spraying Based on Laser Triangulation Measurement," in: *IEEE International Conference on Automation and Logistics*, IEEE, pp. 865-868, 2009.
22. Sung, K., Lee, H., Choi, Y., and Rhee, S., "Development of a Multiline Laser Vision Sensor for Joint Tracking in Welding," *The Welding Journal*, Vol. 4, pp. 79-85, 2009.