

라인레이저를 이용한 3D 모델 추출 방법

윤춘호^a, 김태기^a, 조용욱^a, 남기원^a, 임충혁^{a*}

3D Extraction Method Using a Low Cost Line Laser

Chun Ho Yun^a, Tae Gi Kim^a, Yong Wook Cho^a, Gi Won Nam^a, Choong Hyuk Yim^{a*}^a Department of Mechanical System Design Engineering, Seoul National University of Science and Technology,
232, Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul 01811, Korea

ARTICLE INFO

Article history:

Received	24	December	2016
Revised	6	February	2017
Accepted	14	February	2017

Keywords:

3D scanning
Line laser
CCD camera
Turntable
Calibration
Surface reconstruction

ABSTRACT

In this paper, we proposed a three-dimensional(3D) scanning system based on laser vision technique for 3D model reconstruction. The proposed scanning system consists of line laser, camera, and turntable. We implemented the 3D scanning system using low quality elements. Although these are low quality elements, we reduced the 3D data reconstruction errors greatly using two methods. First, we developed a maximum brightness detection algorithm. This algorithm extracts the maximum brightness of the line laser to obtain the shape of the object. Second, we designed a new laser control device. This device helps to adjust the relative position of the turntable and line laser. These two methods greatly reduce the measuring noise. As a result, point cloud data can be obtained without complicated calculations.

1. 서 론

최근 3D 산업의 급격한 발전은 산업시장의 큰 변화를 만들고 있다. 다양한 원리의 3D 프린팅 기술이 개발되고 있고, 누구나 쉽게 경험해볼 수 있을 만큼 상용화되어 가고 있다. 또한 대학교의 3D 프린팅 강좌가 개설되는 등 3D 프린팅 기술의 발전과 함께 3D 스캐닝 기술도 개발되고 있다.

3D 스캐닝의 방법에는 다양한 방법이 존재하고, 그에 따라 많은 제품들이 만들어지고 있다. 그러나 성능 대비 높은 가격으로 인해 3D 스캐너를 경험해볼 기회가 적다. 이러한 상용화 문제를 해결하기 위해서는 경제성과 편리성을 갖춘 3D 스캐닝 시스템이 필요하게 되었다. 그래서 우리는 비교적 낮은 성능의 요소들로 3D 스캐너를 구현하고, 누구나 쉽게 원리를 이해할 수 있는 기술개발을 목표로

로 한다. 제안하는 3D 스캐너는 라인레이저, 카메라, 턴테이블로 구성되어 있고, 복잡한 계산이 없는 영상처리 알고리즘을 적용하여 구현하였다. 턴테이블 위에 피사체를 올리고 라인레이저를 조사한다. 피사체가 360도 회전하는 동안 카메라를 이용하여 일정 간격으로 연속 촬영한다. 촬영된 사진을 OpenCV를 이용하여 보정한다. 여기서 이용하는 OpenCV는 오픈 소스 컴퓨터 비전 C 라이브러리이다. 실시간 이미지 프로세싱에 중점을 둔 라이브러리로 이미지 프로세싱을 위한 함수들을 제공해준다. 이렇게 보정된 사진에서 레이어 점의 픽셀 값을 얻어낸다. 얻어낸 픽셀 값과 회전에 의해 사진이 가지는 위치 값을 이용하여 3차원 점 데이터를 얻는다. 얻어진 점 데이터를 메쉬랩 프로그램을 활용하여 면화하여 추출한다. 본 연구에서는 용이한 기구 배치의 방법을 제시하였고, 3차원 점 데이터를 얻기 위한 영상처리 기법 제안 및 적용 실험을 하였다.

* Corresponding author. Tel.: +82-2-970-6345

Fax: +82-2-974-8270

E-mail address: chyim@seoultech.ac.kr (Choong hyuk Yim).

2. 본 론

2.1 기구 설계

이 장에서는 3D 스캐너의 구성요소와 배치, 또한 레이저 조절 기구에 대해 설명한다.

2.1.1 구성요소와 배치

스캔을 하기 위한 가장 기본적인 구성요소는 3가지이다. 즉, 측정 대상을 올려 회전시킬 수 있는 테이블, 대상의 외곽 프로파일을 나타내기 위한 라인레이저, 그리고 그 프로파일을 캡처할 수 있는 광학 카메라가 필요하다.

3차원 데이터를 얻어내기 위해서는 구성요소 간의 상대적인 위치가 중요하다. 본 연구에서는 원통좌표계를 이용하여 2차원 데이터를 3차원으로 변환하기 때문에, 턴테이블과 선형레이저, 카메라의 기하학적인 조건이 만족하도록 위치시키는 것이 중요하다. Fig. 1과 같이, 원통좌표계의 원점을 중심으로 레이저와 카메라의 중심 평면을 일치시켜야 한다^[5].

Fig. 1에서 선형레이저를 모두 포함하는 평면을 ‘레이저평면’이라고 하고, 카메라 화면의 중심선을 통과하고 지면과 수직인 평면을 카메라 평면을 ‘카메라평면’이라고 할 때, 레이저평면과 카메라 평면은 모두 지면에 수직하도록 설정하고, 두 평면이 만나 이루는 직선을 턴테이블의 중심선과 일치하도록 배치한다. 두 직선이 일치할수록, 2차원 데이터를 원통좌표계를 통해 정렬할 때의 오차가 줄어든다. 또한 레이저평면과 카메라평면이 이루는 각도는 ‘사진이 왜곡 보정’장의 정사영각을 결정하기 때문에, 두 직선이 일치할수록 보정의 오차도 줄어든다.

위와 같이 평면의 상관관계를 통해 각도를 결정하였고, 다음으로 구성요소를 배치할 때 고려야할 점은 레이저의 초점거리이다.

레이저는 빛이 렌즈를 통해 굴절되어 대상에 투영되기 때문에, 렌즈의 초점거리가 중요하다. 초점거리에서 나타나는 레이저의 프로파일은 다른 곳보다 더 선명하며, 일정한 두께를 가진다. 초점 부근의 프로파일은 스캔의 정확도를 올려주며, 카메라에 캡처되는 사진의 영상 노이즈를 줄여줄 수 있다. 그러므로 레이저의 초점 거리와 가까운 거리에 대상이 오도록 레이저와 턴테이블의 거리를 설정한다.

다음 장에서 설명하겠지만, 본 연구에서는 레이저의 최대 밝기 알고리즘을 통해 라인을 추출하기 때문에 다른 노이즈를 차단할 수 있는 별도의 암실을 구성하였다.

2.1.2 레이저 조절 기구

구성요소들 간의 상대적 위치는 스캔의 정확성을 올리는데 중요하다. 본 연구에서는 위치의 원점이 되는 턴테이블을 고정하며, 턴테이블과 레이저 사이의 상대적인 위치를 수동으로 조절할 수 있도록 추가적인 레이저 지지대를 설계하였다. Fig. 2는 수동으로 턴테이블과 레이저의 상대적인 위치를 수동으로 조절할 수 있는 기구의 3D 모델링이다.

본 연구에서 고안된 새로운 레이저 지지대는 4가지 구성요소로 구성된다. 지지대는 암실의 바닥에 지지되며 좌우로 직선 조절이 가능한 베이스와 베이스 안에서 회전이 가능한 원판, 레이저의 몸체를 바닥과 평행하게 지지해주는 기둥 부분이 있다. 마지막으로 바닥과 베이스를 고정하고 회전원판이 상하운동을 구속시키는 덮개로 구성되어 있다. 간단한 기구로써, 레이저의 좌우 변위와 2가지 회전운동을 할 수 있다.

2.1.3 선정된 구성요소

본 연구에서 사용한 구성요소의 상세 규격을 제시한다.

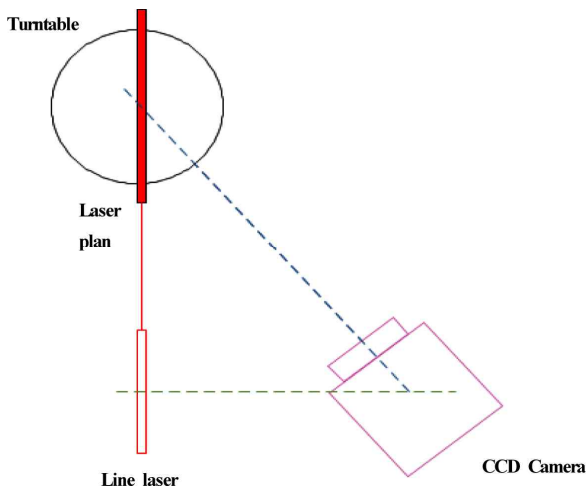


Fig. 1 Component and plot

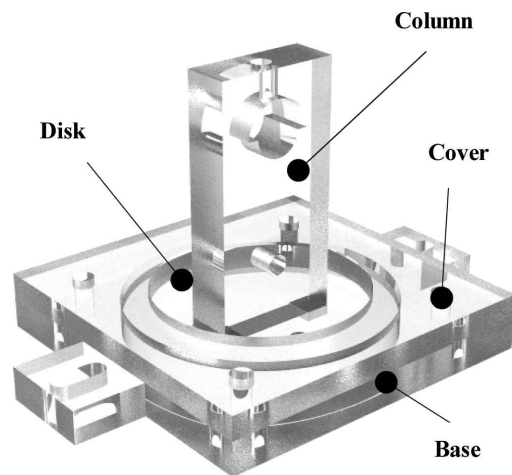


Fig. 2 New laser supporting fixture

2.2 사진의 왜곡 보정

본 장에서는 캡처된 영상 정보에서 나타나는 왜곡 보정에 대해 설명한다.

Table 1 Line laser Specifications

Type (Manufacturers/Model)	Line (LB laser / RED9-23)
Wave length / color	650 nm / Red
Operational voltage	3~5 V DC
Operational current	40 mA
Optical power	5 mW
Operational temp.	-10 ~ 50 Cel.
Spot diameter at 15 meter	At 8 m < pi 6 mm
Line angle	60 deg.



Fig. 3 Line laser

Table 2 Turntable specifications

Manufacturers / Model	Cinetre / T360-25
Height	40 mm
Diameter	250 mm
Maximum weight	10 kg
Rotational speed	360 deg / 33 sec
Rotational direction	C-Clock
Mass	1.2 kg



Fig. 4 Turntable

2.2.1 Calibration^[6,7]

카메라로 사진을 촬영할 때, 불룩한 형태로 영상왜곡이 발생한다. 이것을 보정해 주기 위해서 OpenCV와 체크패턴 판을 이용한다. Fig. 6에서와 같이 체크패턴 판을 여러 장 촬영하고, 얻어진 사진으로 OpenCV에서 제공하는 함수를 이용하여 카메라의 파라미터들을 얻을 수 있다.

이렇게 얻어진 파라미터들을 이용하여 아래의 공식에 의해 화면을 보정할 수 있다. 왜곡된 영상을 I_d , 보정된 영상을 I_u 라 하면, 기본 원리는 I_u 의 각 픽셀 값을 해당 픽셀 좌표를 왜곡시켰을 때의 I_d 의 대응되는 픽셀 값으로 채우는 것이다.

영상 I_u 의 한 점을 x_{p-u}, y_{p-u} 라 하면, 이것을 식 (1)을 이용하여 정상화 좌표 x_{n-u}, y_{n-u} 로 변환한다.

Table 3 CCD camera specifications

Manufacturers / Model	WithRobot / oCam-5CRO-U
Sensor	OmniVision OV5640 CMOS image sensor (3,673.6 μ m \times 2738.4 μ m)
Len	Standard M12 lens with focal length of 3.6 mm
Operational voltage	USB 5 V
Operational current	240 mA
Mass	33.5 g
Case size	42 mm \times 42 mm \times 17 mm
PCB size	39 mm \times 39 mm



Fig. 5 CCD camera

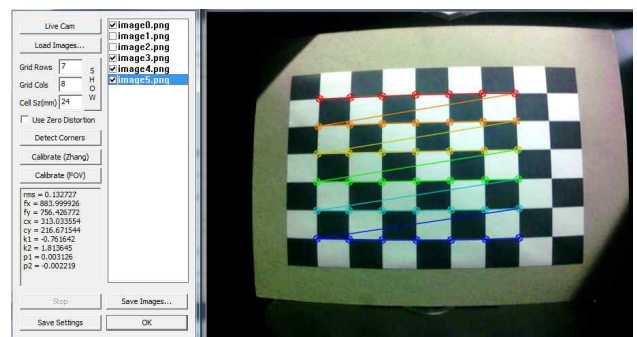


Fig. 6 Detection of parameters

$$x_{n_u} = (x_{p_u} - c_x) / f_x - skew_c \times y_{n_u}$$

$$y_{n_u} = (y_{p_u} - c_y) / f_y \tag{1}$$

식 (2)를 이용하여 중심까지의 거리 R_u 를 구하고, 식 (3)을 이용하여 왜곡된 좌표 x_{n_d}, y_{n_d} 를 구한다.

$$r_u^2 = x_{n_u}^2 + y_{n_u}^2 \tag{2}$$

$$\begin{bmatrix} x_{n_d} \\ y_{n_d} \end{bmatrix} = (1 + k_1 r_u^2 + k_2 r_u^4 + k_3 r_u^6) \begin{bmatrix} x_{n_u} \\ y_{n_u} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 2p_1 x_{n_u} y_{n_u} + p_2 (r_u^2 + 2x_{n_u}^2) \\ p_1 (r_u^2 + 2y_{n_u}^2) + 2p_2 x_{n_u} y_{n_u} \end{bmatrix} \tag{3}$$

마지막으로 식 (4)를 이용하여 x_{n_d}, y_{n_d} 를 다시 픽셀 좌표계로 변환하면 x_{p_u}, y_{p_u} 의 왜곡된 영상에서의 좌표 x_{p_d}, y_{p_d} 를 구할 수 있다.

$$x_{p_d} = f_x (x_{n_d} + skew_c \times y_{n_d}) + c_x$$

$$y_{p_d} = f_y y_{n_d} + c_y \tag{4}$$

여기서 f_x, f_y 는 초점거리, c_x, c_y 는 렌즈 중심 영상좌표, $skew_c$ 는 비대칭계수이다.



Fig. 7 Distorted image (before calibration)

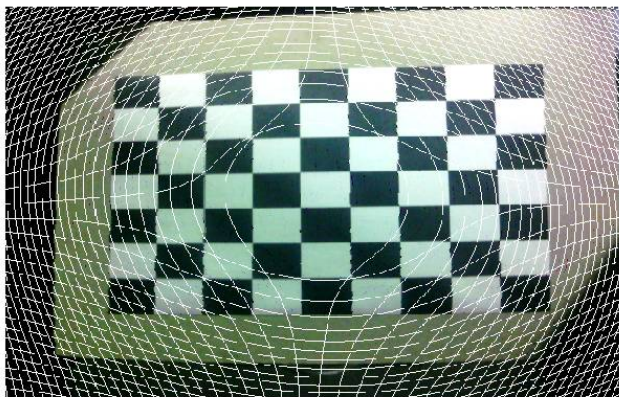


Fig. 8 Compensation for distortion (after calibration)

2.2.2 정사영을 통한 왜곡 보정

카메라가 레이저평면과 90도 각도를 이루고 있을 수 없기 때문에 물체의 외면에 조사된 레이저의 선이 사진 속에 담길 때, 카메라와 수직인 평면으로 정사영 되는 왜곡이 발생한다. 이것은 식 (5)와 같은 간단한 식에 의해 보정할 수 있다.

Fig. 9는 정사영이 되는 것을 보여주고, 여기서 T 는 물체 중심으로부터 표면까지 실제 길이 값, P 는 사진에서의 길이 값, α 는 두 면의 사이 각이다.

$$T = P \div \cos(\theta) \tag{5}$$

2.2.3 픽셀 값과 실제 값의 비율 계산

캘리브레이션을 적용하고 보정된 사진에서 체크패턴 한 칸의 픽셀 길이를 구한다. 또한 실제 체크패턴 한 칸의 길이를 측정하고 둘의 비율을 계산한다. 여기서는 실제 한 칸의 길이가 가로 24 mm, 세로 21 mm의 격자무늬를 이용했고, 사진에서 한 칸의 픽셀 값은 가로 48픽셀, 세로 42픽셀이다. 실제 값보다 2배의 픽셀 값이므로 얻어진 픽셀 값에 0.5를 곱해주어 보정한다.

2.3 점 데이터 추출 및 면화

2.3.1 점 데이터 추출

턴테이블을 이용하여 360도 균일하게 레이저를 조사하는데, 여기서 이용하는 턱테이블의 360도 회전 시간은 33초이다. 따라서 3도 간격으로 0.273초에 한 번씩 촬영을 하여 총 120개의 사진을 얻는다. 이렇게 얻어진 사진을 보정하고, 보정된 사진 속의 레이저 점을 찾기 위해 사진을 그레이 화면으로 변환한다. OpenCV에서 제공하는 간단한 함수로 변환이 가능하고, 변환된 화면에서 픽셀마다 밝기 값을 비교하여 일정 밝기 이상의 레이저 점을 얻어낸다. 이 과정에서 정밀도를 높이기 위하여 최대 밝기를 추출하는 방법을

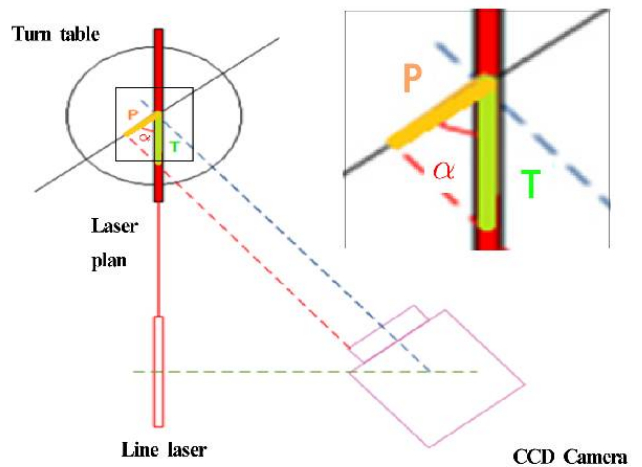


Fig. 9 Orthogonal projection

고안하여 적용했다. 최대 밝기 추출 방법은 해당 Y축의 픽셀에서 레이저 점으로 판단되는 X축 픽셀들 중에서 최대의 밝기를 가진 픽셀만 얻어 낸다. 식 (6)은 사진의 픽셀을 행렬로 나타낸 것이고, 행은 Y축의 길이, 열은 X축의 길이이다. 식 (7)은 n번째 행에서 레이저 점으로 판단되는 p_{na} , p_{nb} , p_{nc} 의 값들 중에서 최대 밝기를 가지는 점 l_n 을 추출하는 함수이다.

$$Pixel = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & \dots & p_{1X_{max}} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & \dots & p_{2X_{max}} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} & \dots & p_{3X_{max}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ p_{Y_{max}1} & p_{Y_{max}2} & p_{Y_{max}3} & \dots & p_{Y_{max}X_{max}} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$l_n = Max(p_{na}, p_{nb}, p_{nc}) \quad (n = 1 \dots Y_{max}) \quad (7)$$

Fig. 10은 시작 화면이고, Fig. 11은 그레이 화면으로 변환한 것이다. Fig. 12는 최대 밝기를 추출하는 알고리즘을 이용하여 얻어진 레이저 점들을 나타낸다.



Fig. 10 Original image from camera

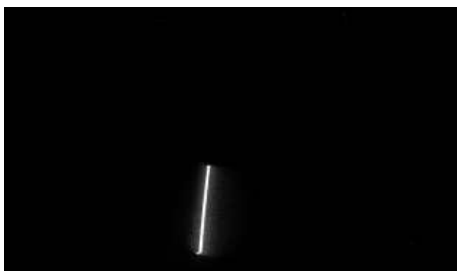


Fig. 11 Converted grey scale image



Fig. 12 Laser point image

얻어진 픽셀 값과 해당 화면의 순서 정보에 의해 최종 3차원 점 데이터를 추출한다. 원리는 원통좌표계를 이용하는데, Fig. 13에서 처럼 턴테이블의 중심을 원점으로 하여 좌표변환을 한다. 식 (8)은 변환 공식이다⁵⁾.

$$\begin{aligned} X_R &= X_L \cdot \cos(\theta) \\ Y_R &= X_L \cdot \sin(\theta) \\ Z_R &= Y_L \end{aligned} \quad (8)$$

여기서 X_R , Y_R , Z_R 은 변환된 원통좌표계의 좌표이고, X_L , Y_L 은 얻어진 영상화면에서의 픽셀 값이다. 그리고 θ 는 3도 단위로 촬영되는 120개의 영상화면 순서 정보이다.

2.3.2 면화⁶⁾

앞의 과정에서 최종으로 얻어진 3차원 점 데이터를 메쉬랩으로 불러와 면화를 하고, 최종 가우시안 스무딩까지 완료하면 3D 솔리드 파일을 얻어 낼 수 있다. Fig. 14는 면화의 과정을 나타낸다.

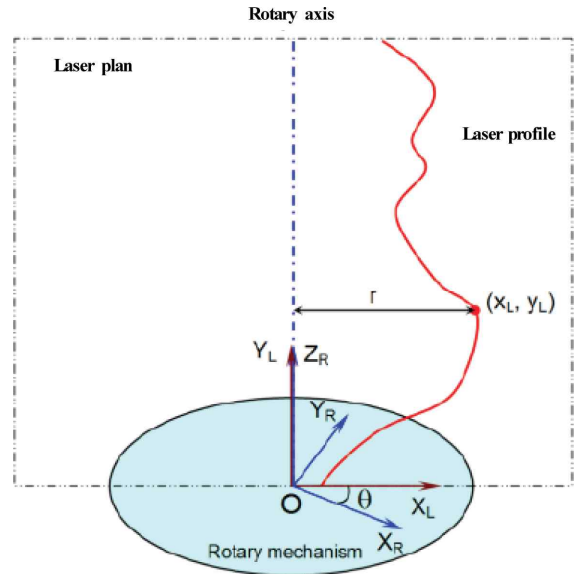


Fig. 13 Coordinates transformation

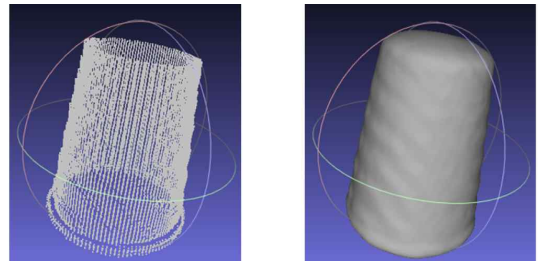


Fig. 14 Meshlab process

단계별로 처음 점 데이터를 불러오고, 주변 점들과의 상관관계에 따라 법선 벡터를 생성한다. 다음으로 푸아송의 표면재구성 알고리즘을 적용시키면 면이 형성되고, 가우시안 스무딩으로 면을 부드럽게 한다^[3,4]. 표면재구성 알고리즘을 적용할 때에 옥트리 뎀스 값에 따라 정밀도가 달라졌고, 일반 컴퓨터에서는 최대치가 10으로 여기서도 10의 값을 적용했다.

3. 결론

앞의 단계를 통해 물체 표면의 3차원 점 데이터를 얻을 수 있고, 면화까지 완료하여 최종적인 3D 모델을 얻을 수 있었다. Fig. 15는 종이컵을 스캔하여 얻은 점 데이터의 바닥 지름을 측정된 결과이고, 바닥지름의 실제 값 49 mm에서 약 +0.15 mm 정도의 오차가 발생했다. 이렇게 불룩한 외형을 측정할 경우 약 $\pm 0.3\%$ 의 오차로 스캔이 가능하다.

여기서 구현한 3D 스캐너는 목표했던 것처럼 저성능, 저가의 구성요소들과 쉬운 원리로 3D 스캐닝을 구현했다. 사용하는 모든 재료의 비용이 25만 원 정도로 저렴하고, 따로 회로가 필요하지 않은 턴테이블과 라인레이저를 이용하는 간단한 방식이다. 주요 과정인 카메라의 왜곡 보정을 하는 방법은 OpenCV의 함수로 구현과 이해가 쉽고, 점 데이터를 얻는 영상처리 알고리즘 또한 매우 간단함을 볼 수 있다. 이를 통해 누구나 쉽게 3D 스캐닝을 경험해보고 이해할 수 있을 것이다.

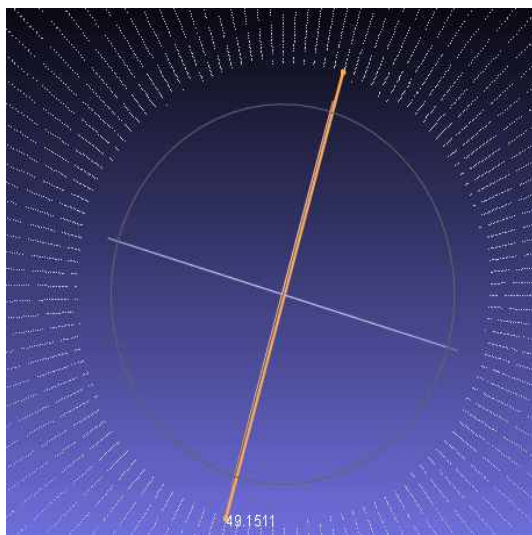


Fig. 15 Result value for measuring error

본 연구가 간단한 원리와 저렴한 비용으로 3D 스캔을 할 수 있음을 충분히 보였으나 스캔이 가능한 물체에 한계를 보이는 문제점도 내재하고 있었다. 즉, 표면이 너무 어둡거나, 굴곡이 심한 물체는 오차가 심하게 발생했다. 이를 보완하기 위해서는 여러 가지 방법이 있는데, 복수의 카메라를 사용하여 촬영의 사각지대를 보완할 수 있을 것이다. 또한 수동기어 턴테이블을 이용하여 더 세밀한 각도의 변화를 주어 더 정밀한 점 데이터를 얻을 것으로 예상된다. 광 삼각법, 오도메트리, 패턴광의 이용 등의 다른 원리의 방법으로서의 스캐너 제작을 생각할 수 있는데, 그렇게 되면 복잡한 계산이 필요하고 저성능의 요소들로 구현하기가 어려울 것으로 예상된다.

후 기

본 연구는 서울과학기술대학교 교내 일반과제 연구비 지원으로 수행되었습니다.

References

- [1] Jung, M. Y., Lee, C. W., 2005, C# Digital Image Processing - C# Digital Image Processing Programming, MiraeCom, Republic of Korea.
- [2] Shin, D. W., 2014, ATmega128 basic and applied 1, OHM, Republic of Korea.
- [3] Pharr, M., Jakob W., Humphreys G., 2015, Physically Based Rendering: From Theory To Implementation, Acorn publisher, Republic of Korea.
- [4] Jung, S. H., Lee, M. H., 2007, Computer vision business programming, Hongneung Science publisher, Republic of Korea.
- [5] Huu, C. N., Lee, B. R., 2015, A Study on Three-Dimensional Model Reconstruction Based on Laser-Vision Technology, A Thesis for a Doctorate, University of Ulsan, Republic of Korea.
- [6] Lee, D. P., viewed 20 August 2016, Camera Calibration, <<http://darkpgmr.tistory.com>>.
- [7] Lee, D. P., viewed 20 August 2016, Distortion Correction for Camera, <<http://darkpgmr.tistory.com>>.
- [8] Fagan, T. J., viewed 7 May 2016, How to Create an STL file form a XYZ file in MeshLab, <<http://fabacademy.org>>.