

라인 레이저를 이용한 원통 부착물의 심도 측정

김용하[†], 고광진^{**}, 연승호^{***}, 김재민^{****}

Depth Measurement of Materials Attached to Cylinder Using Line Laser

Yongha Kim[†], Kwangjin Ko^{**}, Sungho Yeon^{***}, Jaemin Kim^{****}

ABSTRACT

Line-laser beams are used for accurate measurement of 3D shape, which is robust to external illumination. For depth measurement, we project a line-laser beam across an object from the face and take an image of the beam on the object surface using a CCD camera at some angle with respect to the face. For shape measurement, we project parallel line-laser beams with narrow line to line distance. When a layer of thin materials attached to a cylinder is long narrow along its circumference, we can measure the shape of the layer with a small number of parallel line beams if we project line beams along the circumference of the cylinder. Measurement of the depth of the attached materials on a line-laser beam is based on the number of pixels between an imaginary line along the imaginary cylinder without the attached materials and the beam line along the materials attached to the cylinder. For this we need to localize the imaginary line in the captured image. In this paper, we model the shape of the line as an ellipse and localize the line with least square estimate. The proposed method results in smaller error (maximum 0.24mm) than a popular 3D depth camera (maximum 1mm).

Key words: Line Laser, Least Square Method, Depth Measurement, Cylinder

1. 서 론

1.1 기존의 심도 측정법 및 문제점

산업 현장에서 출품되는 물품의 외관 검사를 위해, 심도를 측정하여 오차를 확인하는 방법이 사용되고 있다. 심도 측정 방법으로는 스테레오 카메라를 이용하는 방법과 심도 카메라(3D depth camera)를

이용하는 방법 등이 있다. 스테레오 카메라를 이용하는 방법은 외부조명에 민감하여, 검사 환경을 외부로부터 독립시키는 추가시설을 필요로 하는 단점이 있다[1]. 0.2mm 이내의 높은 정밀도를 만족하는 심도 카메라의 가격은 몇 천불에서 몇 만 불의 고가이며, 3000불 이내의 저가의 심도카메라는 처리속도가 2분이나 소요되는 문제점이 있다 [2]. 실시간 처리가 가

* Corresponding Author : Jae Min Kim, Address: (05649) 89, Bangi-dong, Songpa-gu, Seoul, Korea, TEL : +82-2-402-1634, FAX : +82-2-320-1120, E-mail : jmkim@hongik.ac.kr

Receipt date : Jan. 9, 2017, Revision date : Jan. 24, 2017
Approval date : Jan. 25, 2017

[†] Department of Electrical Information Control Engineering, Hongik Univ.
(E-mail : kimyonghaya@naver.com)

^{**} Department of Electrical Information Control Engineering, Hongik Univ.
(E-mail : kokwangjin09@naver.com)

^{***} Department of Electrical Information Control Engineering, Hongik Univ.

(E-mail : yearnsh@hanmail.net)

^{****} School of Electronic and Electrical Engineering, Hongik Univ.

* This work was supported by 2014 Hongik University Research Fund and Business for Cooperative R&D between Industry, Academy, and Research Institute funded Korea Small and Medium Business Administration in 2016.

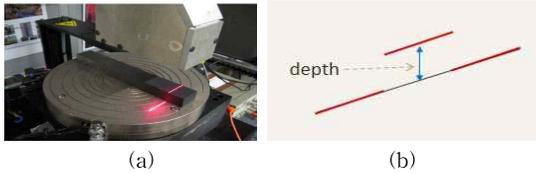


Fig. 1. Laser-based vision system proposed by W. Huang and R. Kovacevic [2]. (a) setup for system, and (b) depth measurement.

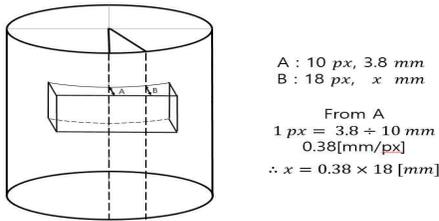


Fig. 2. Materials attached to a cylinder.

능하고 가격이 저렴하여 보급형으로 널리 사용되는 프라임센서사의 심도카메라가 있다. 이 카메라는 점 형태로 맺히는 적외선의 크기를 측정하여 심도를 계산한다. 하지만 점간의 간격이 균일하지 않게 방출되며 측정 오차가 최대 1mm 되는 한계가 있다[3].

실시간 처리가 가능하고 높은 정밀도를 만족하는 방법으로 Fig. 1과 같이 라인 레이저 빔을 사용하는 레이저 기반 비전 시스템이 있다. 이 방법은 평면 위에 놓여진 물체의 심도(depth)를 측정하는 방법으로, 객체에 투영된 라인 레이저 빔(Fig. 1(b)에서 붉은색 선)과 객체가 없는 가상의 평면에 투영된 가상의 선(Fig. 1(b)에서 회색선) 간의 거리(Fig. 1(b)에서 파란색)를 측정한다[2].

물체 표면의 정면에서 투영되는 라인 레이저 빔은 물체의 표면에서 반사하게 되고, 반사된 라인 빔을 정면과 일정 각도의 CCD 카메라로 개체 표면에 투

영된 빔을 촬영한다. 물질의 재질과 표면 상태에 따라 램버시안 반사(lambertian reflection), 반투명 반사(translucid reflection), 거울반사(specular reflection)로 분류할 수 있으며, 이러한 반사 형태에 따라 촬영된 영상에서 빔의 두께가 달라지게 된다[4]

차량의 전장 부품 중에는 원통 형태의 축에 다양한 형상의 금속 물질을 용접하여 부착한다. 이러한 전장 부품의 외관 검사를 위하여 원통에 부착된 금속 물질 형상 및 용접 비드의 심도 측정이 필요하다. 금속 물질의 표면이 불규칙한 경우 램버시안 반사 현상을 보여주고 있다.

Fig. 2와 같이 원통에 부착된 물체의 심도를 라인 레이저 기반 비전 시스템으로 측정하기 위하여 원주 방향으로 라인 레이저 빔을 투영하는 경우, 가상의 원통에 투영된 빔의 모양은 Fig. 3(c),(d)와 같이 카메라의 촬영 각도에 따라 다른 형상을 가진다. 때문에 가상의 원통에 투영된 빔을 형상을 찾는 방법이 필요하다.

1.2 제안하는 방법

두 원통(cylinder)을 용접하여 연결하는 경우, 용접 부위는 좁은 폭을 가지며 원통의 원주를 따라 길게 얇은 층을 이루고 있다. 이와 같이 원통에 부착된 물체의 심도를 라인 레이저 빔을 이용하여 실시간으로 높은 정확도로 측정하고자 한다. 심도를 측정하기 위해서는, 라인레이저 빔을 원통의 축과 평행하고 원주와 수직으로 투영하는 방법과 원통의 축과 수직이면서 원주와 평행하게 투영하는 두 방법이 있다. 원통의 축과 평행하여 투영하는 경우, 투영된 라인 레이저 빔의 상이 직선의 형태를 가지고 있기 때문에, 영상에서 투영된 빔의 위치를 나타내는 직선을 휴변환(hough-transform)[5] 등의 방법으로 실시간

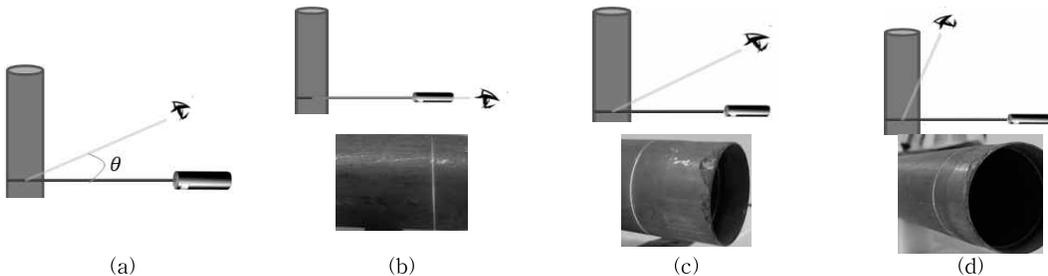


Fig. 3. Experiment environment and the shape with different θ . (a) Environment, (b) $\theta \approx 0^\circ$, (c) $\theta \approx 30^\circ$, and (d) $\theta \approx 70^\circ$.

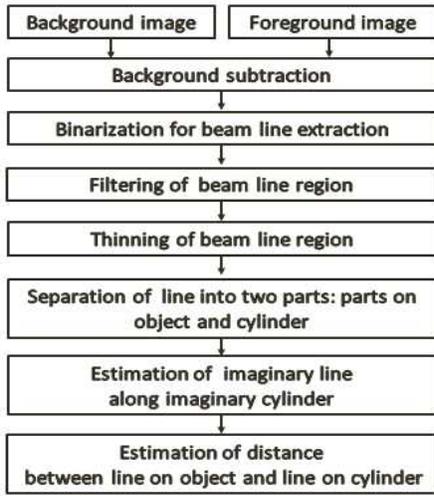


Fig. 4. The overall block diagram.

으로 측정이 가능하다. 하지만 이 경우에는 많은 라인 레이저 빔을 투영하여야 한다. 예를 들어 영상에 촬영된 원주를 따라 형성된 부착물의 길이가 20cm이고 너비가 1cm일 때, 레이저 빔의 간격이 2mm 라면 100개의 라인 레이저 빔을 투영하고 촬영하여야 한다. 이는 많은 처리 시간을 필요로 한다. 반면에 원주와 평행하게 라인 레이저 빔을 투영하면, 1cm 너비의 용접 비드에 2mm 간격의 라인 레이저 빔을 5개만 투영하면 된다. 원통의 축과 평행하게 라인 레이저 빔을 투영하는 방법에 비하여 처리 시간을 대폭 단축할 수 있다. 본 논문에서는 원통의 축에 수직으로 라인 레이저 빔을 투영하여 생기는 상의 모양을 타원의 수식으로 모델링 하고, 타원의 매개변수를 추정한다. 휴변환으로 변수값을 추정하는 것은 많은 연산시간이 소요되기 때문에, 본 논문에서 타원 모델의 매

개 변수값을 초기화하고 비선형 최소자승법[6]을 반복적으로 적용하여 모델 변수를 추정한다. 또한 영상에서 투영된 라인 레이저 빔을 정확하게 추출하고 세선화하기 위하여, 과반 필터와 곡률 보정을 적용한다. 제안한 방법의 전체 구성도는 Fig. 4에서 보여주고 있다. 구성도의 단계별 실험 결과는 Fig. 10에서 보여주고 있다.

2. 본 론

2.1절에서는 부착물이 없는 원통에 투영된 라인 레이저 빔을 촬영한 이미지에서 레이저 빔의 궤적을 검출하는 방법을 기술한다. 2.2절에서는 심도를 아는 부착물을 부착한 원통에 투영된 라인 레이저 빔을 궤적을 검출하고, 이를 통하여 부착물의 심도를 추정하는 방법을 기술한다.

2.1 부착물이 없는 타원에 투영된 라인 레이저 빔의 궤적 추정

원통에 부착된 물체의 심도를 측정하기 위해서는 부착물이 없는 가상의 원통에 투영된 라인 레이저 빔의 궤적을 추정하여야 한다. 우선 Fig. 5와 같이 고속 회전하는 육각거울(polygon-mirror)을 이용하여 라인 레이저 빔을 생성한다. 이 라인 레이저 빔을 원통과 수직이면서 원주와 평행한 방향으로 투영하여 생기는 상을, Fig. 3과 같이 보는 위치를 투영된 빔과 θ 각도가 되게 바라본 카메라에서 촬영한다. 영상에서 적색(Red) 성분을 분리시킨 후 이 성분을 이용하여 라인 레이저 빔이 투영된 부분의 화소를 검출한다. 레이저 빔이 투영된 부분은 빛의 난반사로 인하여 가는 선이 아니라 일정한 폭을 가지는 밴드의

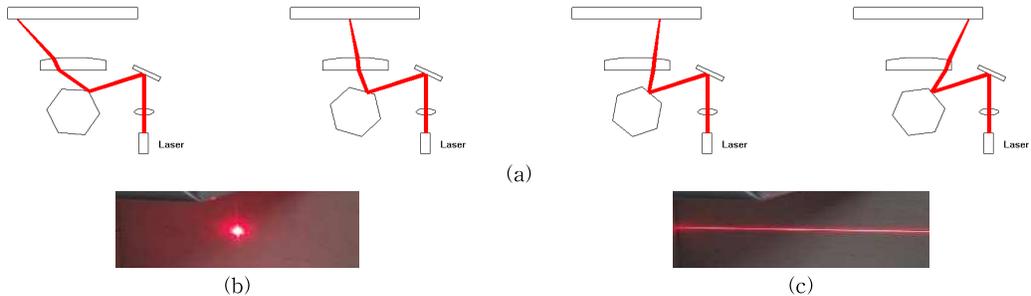


Fig. 5. Concept of the Polygon-mirror and result images according to the rotation, (a) various positions of laser pointer according to the polygon-mirror's rotation, (b) when the Polygon-mirror's stopped, and (c) when the Polygon-mirror's rotating.

형태를 가지는데, 이를 세선화하여 레이저 빔의 궤적을 가는 선으로 나타낸다. 전체 레이저 빔의 궤적을 타원으로 모델링하고, 가우시안 뉴턴 방법으로 매개변수 값을 반복하여 변화시키면서 모델링한 타원 형상을 세선화한 결과와 일치하도록 한다.

2.1.1 레이저 상 검출

영상에서 라인 레이저 빔의 상을 검출하는 방법으로는 레이저 빔이 투영된 화소와 투영되지 않는 화소의 밝기 및 색깔의 차이를 이용하는 방법이 널리 사용되고 있다[7,8]. 본 논문에서는 심도 측정하고자 하는 객체의 밝기와 색소와 관계없이 강인하게 레이저 상을 검출하기 위하여 배경 차분 영상에 임계값을 적용하는 방법을 사용하였다[9]. 레이저 광원이 적색이 이기 때문에 배경차분 이미지의 R성분이 임계값보다 큰 화소를 검출한다. 우선 동일 환경에서 레이저 빔을 켜진 상태와 끈 상태로, 배경과 전경 이미지를 각각 획득하고, 촬영된 이미지의 관심 영역(R.O.I)부분의 차분 이미지를 획득한다. 차분 영상에 임계값을

적용하여 Fig. 6(d)와 같이 이진 영상을 생성한다. Fig. 6에서 단계별 결과를 보여주고 있다.

2.1.2 과반 필터와 곡률 보정을 통한 검출된 선 두께의 균일화

레이저 빔이 투영된 객체 표면이 균일하지 않는 경우 표면에서 빛의 난반사한다. 그 결과 앞에서 획득한 이진 이미지의 두께가 불균일한 문제점이 있다. 때문에 이에 대한 보정을 통한 세선화 과정이 필요하다.

이진 이미지의 두께를 균일하게 만들기 위해서는 우선 Fig. 7(a)와 같이 노이즈에 의하여 돌출된 부분을 Fig. 7(b)와 같이 제거할 필요가 있다. 이를 위해서 본 논문에서는 과반 필터를 적용한다[10]. 과반 필터는 0과 1로 이루어진 이진 이미지에서 선택된 화소를 중심으로 $n \times n$ 창 내에서 1의 값을 가지는 화소의 개수가 창 내의 전체 화소 개수의 절반보다 크다면 선택된 화소 값을 1로, 그렇지 않다면 0으로 취한다.

과반 필터를 이용하여 라인 레이저 빔의 상에서 돌출 부위를 제거한 후, Fig. 8과 같이 레이저 빔의

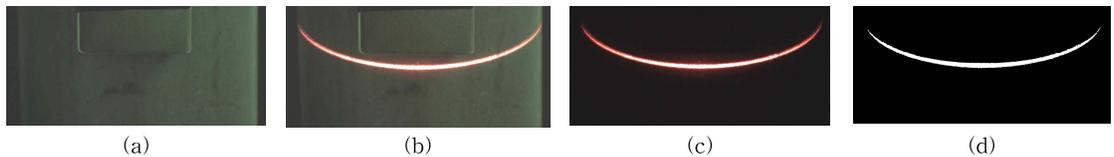


Fig. 6. Detection of a line laser beam in the captured image. (a) Background, (b) Foreground, (c) Difference, and (d) Binary image.

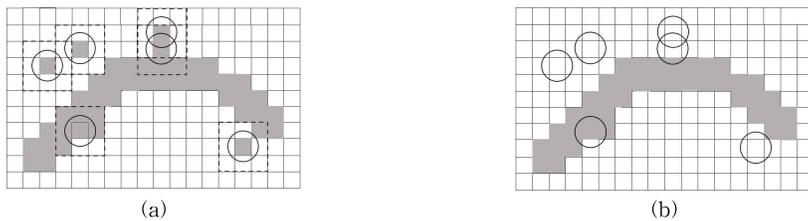


Fig. 7. Majority filter's input and output image (in case of 3x3 window). (a) Majority filter's input image, and (b) Majority filter's output image.

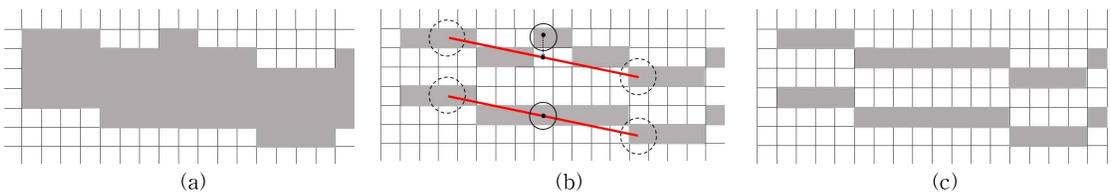


Fig. 8. Different curvatures at two sides and smoothing the side with larger curvature. (a) majority filtered image, (b) different curvatures, and (c) curvature regularization.

두께를 균일하게 하는 2차 과정을 진행한다. 일정 두께를 가지는 투영된 라인 레이저 빔의 상이 Fig. 8에서와 같이 가로로 놓여지는 경우, 상의 위 경계선과 아래 경계선의 곡률을 동일하게 한다. 이는 객체 표면에서 라인 레이저 빔의 난반사가 없다면 위와 아래의 곡률이 동일하기 때문이다. 한 곡률이 다른 곡률보다 크다면, 큰 곡률은 난반사로 인한 왜곡으로 판정하고 이를 작은 곡률과 같게 보정한다. Fig. 8(c)는 보정 결과를 보여주고 있다.

2.1.3 세선화

영상에서 라인 레이저 빔의 궤적을 구하기 위해서는, 영상에 맺힌 라인 레이저 빔 상의 세선화가 필요하다. 본 논문에서는 균일한 두께를 가지게 되도록 처리된 상의 두 측면 경계와 라인 레이저 빔 상과 수직인 가상의 선과 만나는 두 점의 중앙값을 취하여 세선화를 수행한다.

2.1.4 궤적 모델의 초기 매개변수 값 설정 및 최적화

세선화 된 점들은 타원의 일부이므로 이를 이용하여 전체 궤적을 추정한다. 전체 궤적은 타원으로 모델링한다. 모델 매개변수의 초기값을 설정하는데, 타원의 중심점인 x_c, y_c 점은 다음과 같이 구한다. 이미지의 가로를 x 축, 세로를 y 축이라 하며 좌측 상단을 (0,0)이라 하고 오른쪽, 아래쪽 방향으로 값이 증가한다고 할 때, 탐지된 점들 중 x 축에서의 최대와 최소 값의 중앙 지점을 x_c 라 하고 가장 작은 y 의 값을 y_c 라 설정한다. 설정된 타원의 중심으로부터 가장 큰 차이를 보이는 x, y 값을 각각 타원의 a, b (장축, 단축)으로 설정한다. 설정된 초기 타원 식은 아래와 같다.

$$\frac{(x-x_c)^2}{a^2} + \frac{(y-y_c)^2}{b^2} = 1 \quad (1)$$

위 식을 y 에 관하여 바꾸었을 때, 타원의 아랫부분에 대한 식은 다음과 같이 표현된다.

$$y = y_c + \frac{b}{a}(a^2 - (x-x_c)^2)^{0.5} \quad (2)$$



(a)

$$y = p_1 + p_2(p_3 - (x-p_4)^2)^{0.5} \quad (3)$$

$$y = f(p_1, p_2, p_3, p_4) \quad (4)$$

위와 같이 4개의 매개변수를 가지는 식으로 표현 가능하다. 초기에 설정되는 x_c, y_c, a, b 의 값은 정확하게 구할 수 없으므로 위 식 4에 대입하여 계산되는 점의 위치는 실제 위치와는 다르며 오차가 존재한다.

$$error = y - f(x, p_1, p_2, p_3, p_4) \quad (5)$$

이 오차를 최소화방법[6]을 이용하여 p_1, p_2, p_3, p_4 값을 갱신하여 오차를 줄인다.

$$error = \sum_{i=1}^4 \frac{\partial f}{\partial p_i} \cdot \Delta p_i \quad (6)$$

$$\therefore \Delta p_i = \left(\sum_{i=1}^4 \frac{\partial f}{\partial p_i} \right)^{-1} \cdot (y - f(x, p_1, p_2, p_3, p_4)) \quad (7)$$

이 방법을 오차의 변화폭이 작아질 때 까지 반복하여 발견된 점들에 최적화된 타원의 변수 값을 계산한다. 최적화된 타원은 Fig. 9과 같다.

2.2 투영된 라인 레이저 빔 상에서 부착된 물체의 심도 측정

Fig. 3과 같이 위치와 각도가 고정된 라인 레이저 빔과 카메라를 이용하여, Fig. 2와 같이 원통에 부착된 물체의 심도를 측정한다.

2.2.1 부착물이 없는 가상의 원통에 투영된 라인 레이저 빔 상의 추정

레이저 빔의 상은 부착물의 표면과 원통의 표면에 각각 맺히게 된다. 세선화 과정을 거친 라인 레이저의 상은, Fig. 10(d)에서 보여주는 것과 같이 부착물이 없는 원통에 투영된 라인 레이저 빔 상(초록색 선)과 부착물에 투영된 라인 레이저 빔 상(붉은 색 선)으로 분리할 수 있다. 부착물이 없는 가상의 원통에 투영된 라인 레이저 빔 상은 Fig. 10(d)의 초록색으로 나타낸 선에 최적화된 타원을 찾아 Fig. 10(f)와 같이 생성한다.



(b)

Fig. 9. Initial and Optimized Oval-shape. (a) Initial, and (b) Optimized.

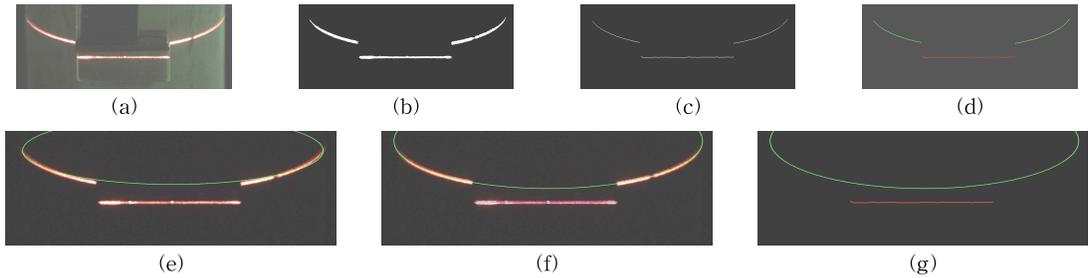


Fig. 10. Step by step procedure to find optimized ellipse. (a) foreground, (b) binarization, (c) filtering and thinning, (d) separation of line into two parts, (e) initial oval, (f) optimized oval, and (g) optimized, object points

2.2.2 부착물의 심도 추정

부착물의 심도는 Fig. 10(f)에서 보여주는 부착물이 없는 가상의 원통에 투영된 레이저 빔 상과 부착물에 투영된 레이저 빔 상의 거리(화소 수)를 이용하여 측정한다. 심도를 측정하기 위해서는 한 화소가 몇 mm를 나타내는지를 사전에 파악하는 것이 필요하며, 이는 심도 값을 아는 부착물을 이용하여 사전에 계산한다.

3. 실험 및 결과

3.1 라인 레이저 기반 비전 시스템

라인 레이저 빔 생성기에 사용되는 레이저는 모듈은 100mW, 650nm이다. 광원의 폭은 0.1mm이다. 하지만 유효거리(30cm-50cm)안에 있는 물체에 라인 레이저 빔을 투영하였을 때 빔의 폭은 0.45mm이다. 이는 빔 생성기에 사용된 육각 회절 미러가 정확하게 수직으로 정렬되어 있지 않기 때문이다. 투영된 레이저 빔 상을 촬영하는 카메라는 IRV테크 HTC-3500 CB로 해상도는 2592 × 1944 이다. 카메라 렌즈는 Technix TLZ001 줌 렌즈이다. 레이저 광원과 부착물간의 거리는 30cm, 카메라와 부착물 표면 간의 각도는 45도 이다.

3.2 실험에 사용된 원통 및 부착물

Fig. 2와 같이 심도를 아는 물체를 원통에 부착하였다. 원통의 직경은 45mm이며, 부착물의 최소 두께는 5.8mm, 좌우 폭은 20mm 이다.

3.3 추정 심도의 이론값

추정된 심도가 맞게 구해졌는지 확인하기 위해서

는 이론값이 필요하다. 이론값은 모델링한 타원 식인 식(2)에 위치에 대응되는 x 의 값을 대입하여 구할 수 있으며, 대응되는 값은 Fig. 11과 식 (9)에서 p 를 구하는 방법으로 계산한다.

$$p = (380 - c_x)[px] \times \frac{20[mm]}{800[px]} \tag{9}$$

Fig. 10(a)에서 표현한 것과 같이 원점(0,0)을 설정하면 반지름이 $r(22.5mm)$ 인 원통에서의 부착물(너비 20mm, 가운데 두께 5.8mm)의 수평 위치(x)에 따른 수직 위치(y)는 아래의 식 (10)처럼 표현할 수 있다. (원의 중심위치($0, r+5.78$), 원통의 반지름 r 을 이용한다.)

$$x^2 + (y - (r + 5.80))^2 = r^2 \tag{5}$$

$$\therefore y = 28.30 - \sqrt{22.5^2 - x^2} \tag{6}$$

이 값을 이용하여 2.2.2절에서 구한 실제 추정 값과의 비교를 통해 오차를 계산한다.

3.4 심도 측정 결과

Fig. 10는 앞의 Fig. 2와 같이 부착물을 붙였을 때, 부착물에 투영된 상이 부착물이 없는 가상의 원통에 투영된 상으로부터 이격된 정확한 위치를 찾기 위한 과정이다. 이격된 거리는 Fig. 10(e)에서 구한 최적화

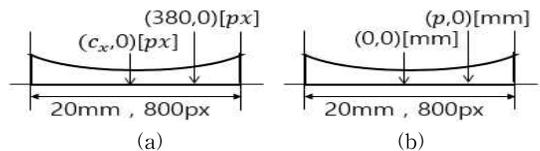


Fig. 11. Conversion from pixel to millimeter with known information. (a) horizontal location denoted by [px], and (b) horizontal location denoted by [mm].

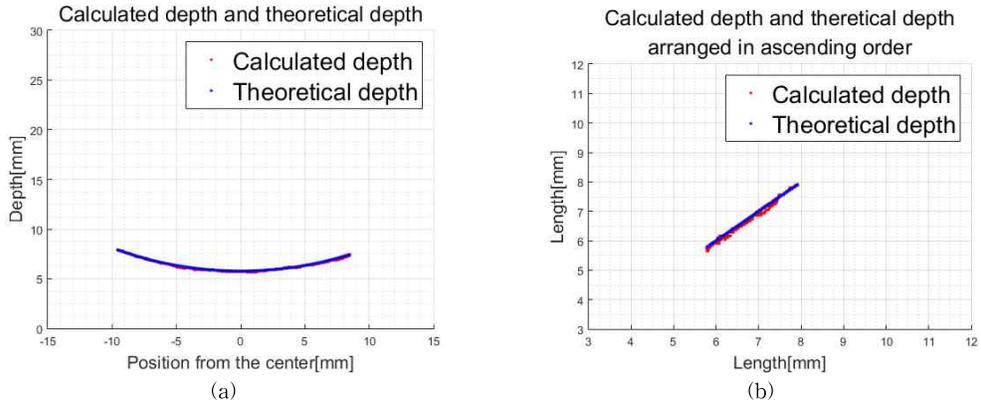


Fig. 12. Object depth, (a) Depth of the object, and (b) Depth in ascending order.

타원의 중심인 c_x 에서의 가장 작은 값을 가지며, 이때 간격의 실측 심도인 5.8mm이다. 사이에 놓이는 화소를 실측 심도인 5.8mm에 기준을 맞춰 환산한 값(x 좌표)을 적용하여 구한 부분들을 실제 길이로 환산한다. Fig. 12(a)는 앞의 결과로부터 구한 부착물체의 심도와 이에 대한 좌측부터 그대로 적용한 이미지이며 Fig. 12(b)는 이 값들을 오름차순으로 정렬시킨 이미지이다.

한 프레임에 대한 결과로부터 구한 절대 오차의 평균은 0.06[mm]이며 최대 오차는 0.20mm, 표준편차는 0.045mm이다. 이 최대 오차는 3D-Camera의 시중 제품으로 나온 Primesense사의 Carmine 1.09와의 최대오차 1mm와 비교하면 성능 면에서 더 정확하다.

Huang[2] 등의 방법은 평면상에 놓여진 물체의 심도를 측정하였다. 영상의 해상도는 659×494, 레이저의 파장은 650nm, 정확도는 0.22-0.55mm이다. 제안한 방법은 원통에 부착된 물체의 심도를 측정하였다. 영상의 해상도는 2592×1944, 레이저의 파장은 650nm, 최대 오차는 0.24mm이다.

3.6 평행한 라인 레이저 빔을 이용한 부착물 형상 추정

LM 가이드를 이용하여 카메라와 레이저 광원을 함께 2mm씩 움직이며 생성한 평행하는 라인 레이저 빔의 상에서 심도를 측정하고 이들을 조합하여 부착물의 형상을 생성하였다. 이는 Fig. 13에서 보여주고 있다. 실험에 사용한 부착물의 표면 상태가 일정하지 않아 난반사가 발생하며, 이로 인해 투영된 레이저 빔의 상의 궤적 추정과 심도 추정에 오차가 발생하였

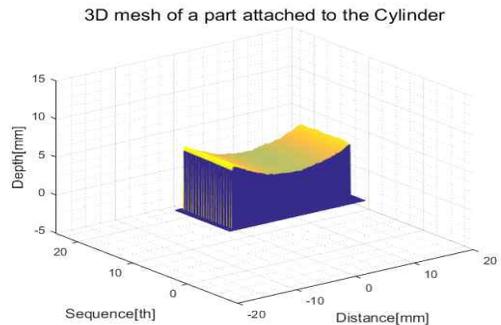


Fig. 13. Reconstructed object shape.

다. 실험을 통하여 추정된 부착물 형상의 최대 오차 및 평균과 표준편차는 Table 1과 같다.

Table 1. Error of sequence images.

Error Max.	0.24 [mm]
Error Average.	0.06 [mm]
Error Std.Dev.	0.04 [mm]

3.7 부착물이 원통의 원주 전반에 걸쳐 분포하는 경우

두 원통을 용접하는 경우 용접 부위는 원통의 모든 원주에 걸쳐 좁은 폭으로 얇게 분포한다. 용접 부위의 품질 검사를 위해서는 LM 가이드로 레이저 광원과 카메라를 함께 원통의 축 방향으로 이동시키며, 평행하는 다수의 라인 레이저 빔을 원통의 용접 부위에 투영한다.

용접 부위의 심도를 측정하기 위해서는 다음과 같이 수행한다.

(a) 부착물이 없는 원통(용접을 하지 않은 부위)에 생성한 라인 레이저 빔을 투영

(b) 라인 레이저 빔의 상을 카메라로 촬영하고, 2.1절에서 기술한 방법으로 상의 궤적을 추정

(c) LM 가이드로 레이저 광원과 카메라를 이동시켜 용접 부위에 라인 레이저를 투영

(d) 세션화 과정을 통하여 부착물에 투영된 상의 궤적을 구함

(e) (b)에서 추정한 궤적을 LM 가이드의 이동거리만큼 이동 시켜, 부착물이 없는 가상의 원통에서의 궤적을 구함

(f) (d)와 (e)에서 구한 궤적의 간격에 놓여지는 화소의 개수를 이용하여 심도 측정.

LM 가이드는 보통, 상급, 정밀급으로 분류되며 정밀도는 각각 최대 0.04mm, 0.02mm, 0.01mm 이다 [11]. 상급 이상의 LM 가이드를 사용하면 10% 이내의 추가 오차로 심도를 측정할 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 라인 레이저 빔을 원통의 축과 수직이면서 원주와 평행하게 원통에 투영하여, 라인 레이저 빔이 투영된 위치의 심도를 실시간으로 추정하는 방법을 제안하였다. 원통과 수직되게 레이저 빔을 투영하고, 레이저 빔의 투영 방향과 θ 의 각도에 놓인 카메라로 투영된 레이저 빔을 촬영하였을 때, 영상에서 레이저 빔의 위치를 타원으로 모델링하고 가우스-뉴턴 방법으로 추정하였다. 다양한 두께의 부착물을 부착하였을 때, 물체를 향해 레이저 빔을 투영하면 부착물의 두께에 따라 원주 상에 맺히는 레이저 빔의 위치는 가상의 타원과 멀어지게 되며, 영상에서 이 간격을 측정하여 실제 거리를 추정하였다. 직경이 4.5cm인 원통의 중앙에 2cm 너비의 부착물을 붙인 원주 상에서 ± 0.24 mm의 오차 이내로 심도를 측정할 수 있었다.

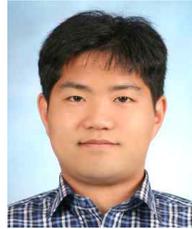
REFERENCE

- [1] S. Shimizu, T. Kondo, T. Kohashi, M. Tsuruta, and T. Komuro, "A New Algorithm for Exposure Control based on Fuzzy Logic for Video Cameras," *Journal of IEEE Transactions on Consumer Electronics*, Vol. 38, pp. 617-623, 1992.
- [2] W. Huang and R. Kovacevic "A Laser-based Vision System for Weld Quality Inspection," *Journal of Sensors*, Vol. 11, pp. 506-521, 2011.
- [3] Specification of 3D Webcam Sensor, <http://www.artcreaction.com/3d-depth-sensor/apple-primense/primense-carmin-1-09-3d-webca.html> (accessed Jan., 06, 2017).
- [4] J. Forest, J. Salvi, E. Cabruja, and C. Pous, "Laser Stripe Peak Detector for 3D Scanners, A FIR Filter Approach," *Proceedings of 17th International Conference on Pattern Recognition*, pp. 646-649, 2004.
- [5] M. Nixon and A. Aguado, *Feature Extraction & Image Processing for Computer Vision*, Academic Press, New York, 2012.
- [6] T. Strutz, *Data Fitting and Uncertainty (A Practical Introduction to Weighted Least Squares and Beyond)*, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2016.
- [7] B.A. Ahlborn, D. Thompson, O. Kreylos, B. Hamann, B. Hamann, and O. Staadt, "A Practical System for Laser Pointer Interaction on Large Displays," *Proceeding of the ACM Symposium, Virtual Reality Software and Technology*, pp. 106-109, 2005.
- [8] M.E. Latoschik and E. Bomberg, "Augmenting a Laser Pointer with a Diffraction Grating for Monoscopic 6dof Detection," *Journal of Virtual Reality and Broadcasting*, Vol. 4, No. 14, pp. 1-9, 2007.
- [9] S. Yeon, J. Kim, "Robust Illumination Change Detection Using Image Intensity and Texture," *Journal of Korea Multimedia Society*, Vol. 16, No. 2, 169-179, 2013.
- [10] E.R. Dougherty and R.A. Ltufo, *Hands-on Morphological Image Processing*, SPIE Press, Bellingham, Washington, 2003.
- [11] Precision Standard Grade of LM Guide, http://pmikorea.mireene.com/skin_build61/sub_page.php?page_idx=138 (accessed Jan., 06, 2017).



김 용 하

2008년~2015년 홍익대학교 전자
전기공학부 학사
2015년~현재 홍익대학교 전기정
보제어공학과 석사
관심분야: 영상처리, 패턴인식, 컴
퓨터비전



연 승 호

2007년~2011년 홍익대학교 전자
전기공학부 학사
2011년~2013년 홍익대학교 전기
정보제어공학과 석사
2013년~현재 홍익대학교 전기정
보제어공학과 박사
관심분야: 화질개선, 객체검출,
객체인식



고 광 진

2009년~2016년 동양미래대학교
로봇자동화공학부 학사
2016년~현재 홍익대학교 전기정
보제어공학과 석사
관심분야: 딥러닝, 영상처리, 컴
퓨터비전



김 재 민

1980년~1984년 서울대학교 전기
공학과 학사
1984년~1986년 서울대학교 전기
공학과 석사
1989년~1994년 Rensselaer
Polytechnic Institute 전기
공학과 박사
관심분야: 영상처리, 패턴인식, 컴
퓨터비전, 딥러닝