

라인 레이저의 산란에 강인한 심도 측정 방법

고광진[†], 연승호^{**}, 김재민^{***}

Depth Measurement Method Robust against Scattering of Line Lasers

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

ABSTRACT

Line-laser beams are used for depth measurement of welding beads along the circumference of a pipe. For this, first we project a line-laser beam on an rotating pipe and take a sequence of images of the beam projected on the pipe using a CCD camera. Second, the projected line laser beam in each image is detected, converted into a thin curve. Finally measure the distance between the thinned curve and an imaginary line. When a line-laser beam is projected to a rough metal surface such as arc welding beads, the beam is severely scattered. This severe scattering makes the thinned curve perturbed. In this paper, we propose a thinning method robust against scattering of line lasers. First, we extract a projected line laser beam region using an adaptive threshold. Second, we model a thinned curve with a spline curve with control points. Next, we adjust the control points to fit the curve to the projected line-laser beam. Finally, we take a weighted mean of thin curves on a sequence of image frames. Experiments shows that the proposed thinning method results in a thinning curve, which is smooth and fit to the projected line-laser beam with small error.

Key words: Line Laser, Least Square Method, Depth Measurement, Spline Curve

1. 서 론

1.1 기존의 심도 측정법을 위한 세션화 방법 및 문제점

산업 현장에서는 물품의 외관 검사로 심도를 측정하여 형상을 확인하는 방법을 사용하고 있다. 심도 측정을 위하여 다양한 방법이 사용되고 있으나, 실시간 처리로 높은 측정 정밀도를 만족하면서 저가로 구현이 가능한 방법으로는 라인 레이저 빔을 사용하는 레이저 기반 비전 시스템이 있다[1,2]. 이 방법은 Fig. 1(a)와 같이 평면 위에 심도를 측정하고자 하는

물체를 올려놓고 라인 레이저 빔을 물체에 투영한다. 물체에 투영된 붉은색의 라인 레이저 빔과 객체가 없는 가상의 평면에 투영된 가상의 선(Fig. 1(b)에서 회색선) 간의 거리(Fig. 1(b)에서 파란색)를 측정하며, 심도는 이 거리에 비례한다[1]. 이 거리를 측정하기 위하여 CCD 카메라로 면과 45도 각도로 투영된 라인 레이저 빔을 촬영하고, 영상에서 물체에 투영된 라인 레이저 빔과 가상의 선 사이의 화소의 개수로 거리를 측정한다. 라인 레이저 빔은 물질의 재질과 표면 상태에 따라 램버시안 반사(lambertian reflec-

※ Corresponding Author : Jaemin Kim, Address: (05649) 89, Bangi-dong, Songpa-gu, Seoul, Korea, TEL : +82-2-402-1634, +82-10-5683-1634 FAX : +82-2-320-1120, E-mail : jmkim@hongik.ac.kr

Receipt date : Jan. 10, 2018, Revision date : Feb. 12, 2018
Approval date : Feb. 20, 2018

[†] 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 2015 Hongik University Research Fund.

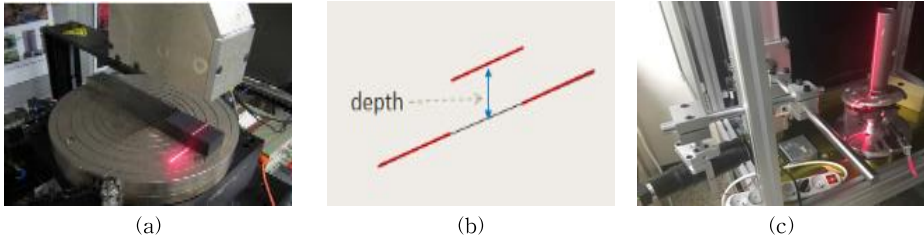


Fig. 1. Laser-based vision system: (a) an object on a flat background, (b) the depth measurement of the object, and (c) a line laser beam projected on a rotating pipe.

tion), 반투명 반사(translucid reflection), 거울반사(specular reflection)로 분류되는 산란을 하게 되는데, 이러한 산란 형태에 따라 촬영된 영상에서 라인 레이저 빔의 두께가 달라진다[3]. 영상에서 물체에 투영된 라인 레이저 빔과 가상의 선과의 거리를 측정하기 위하여서는 굵은 라인 레이저 빔을 가는 선으로 만드는 세선화 과정이 필요하다.

세선화 방법으로 J. Forest 등은 투영된 라인 레이저 빔은 중심 부분이 가장 밝고 주변으로 갈수록 밝기가 낮아지는 밝기의 분포를 가우시안 형태로 모델링하고, 부호 변화점(zero crossing point)을 찾는 방법으로 레이저 빔을 세선화한다[3]. 이 방법은 매끄러운 금속에 투영된 라인 레이저 빔의 세선화에는 매우 효과적이거나, 아크 용접 부위와 같이 거친 금속 표면에 투영된 레이저 빔의 산란이 심한 경우 세선화된 선이 교란되는 문제점이 있다. Y. Kim 등[4]은 임계값을 적용하여 영상을 이진화 한 후, 연결 요소 분석 방법(connected component analysis method) [5]로 라인 레이저 빔 영역을 일차로 추출하고, 과반 모폴로지 필터(majority morphology filter)[6]를 적용하여 선을 매끄럽게 만든 후 중심점으로 라인 레이저 빔을 세선화 한다. 이 방법 또한 아크 용접 부위와 같이 거친 금속 표면에 투영된 레이저 빔의 산란이

심한 경우 세선화된 선이 교란되는 문제점이 있다. R. Usameniaga 등은 라인 레이저 투영된 영역은 주변보다 밝기가 상대적으로 높은 점을 이용하여 두 영역을 밝기 차를 구별할 수 있는 임계값을 정하여 라인 레이저 영역을 추출하고, 추출한 영역의 중심점으로 라인 레이저 빔을 일차로 세선화한다. 측정하고자 하는 객체의 심도는 배경의 심도와 차이가 뚜렷한 점을 이용하여 영역 분할 및 반복(split and merge) 방법으로 영역을 분할 한 후 각 영역을 스플라인 곡선(spline curve)로 근사화 하여 세선화한다[7]. Fig. 2(a)에서와 같이 측정하고자 하는 형상의 변화가 심한 경우, 두 영역을 밝기 차를 구별할 수 있는 임계값을 정하여 라인 레이저 영역을 추출하면 추출된 선의 굵기 균일하지 않을 뿐만 아니라, 추출된 선들이 끊어질 수도 있다. 때문에 좀더 효율적인 라인 레이저 선의 추출방법이 필요하다.

1.2 제안하는 방법의 필요성

본 논문에서는 원통의 원주를 따라 아크 용접한 용접 비드[8]의 심도 측정에 관하여 기술한다. 심도 측정을 위한 라인 레이저 기반 비전 시스템은 Fig. 1(c)와 같이 회전하는 원통에 라인 레이저 빔을 투영하고, CCD 카메라로 투영된 레이저 빔을 연속 촬영

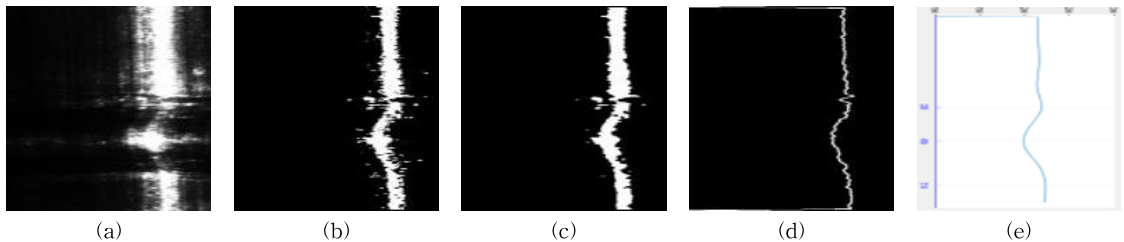


Fig. 2. Thinning of a scattered line-laser beam: (a) scattered beam, (b) detected beam, (c) filtered beam, (d) the thinning result, (e) the thinning results of the proposed method.

한다.

아크 용접으로 생성된 용접 부위와 같은 매우 거친 표면에 투영된 라인 레이저 빔은 Fig. 2(a)와 같이 매우 불균일한 밝기 분포를 가지고 있어 기존의 세선화 방법으로는 높은 정밀한 심도 측정이 어렵다.

본 논문에서는 위에서 기술한 비전 시스템에서 레이저 빔의 산란에 강인한 세선화 및 심도 측정 방법을 제안한다. 제안된 방법은 우선 적응 이진화 방법으로 투영된 라인 레이저 빔 영역을 추출한다. 이 방법은 라인 레이저 빔을 따라 작은 윈도우를 움직여 가면서 윈도우 내에서 화소 밝기의 히스토그램을 생성하고 이를 바탕으로 임계값을 생성한 후 이진화한다. 제안된 적응 이진화 방법은 Fig. 2(a)와 같이 매우 불균일한 밝기 분포를 가지는 투영된 라인 레이저 빔도 적응 이진화 후에는 Fig. 2(b)와 같이 추출된 영역의 굵기가 사전에 정한 일정한 값 이상이 된다.

추출된 라인 레이저 빔 영역이 많은 노이즈를 포함하고 있기 때문에 적응 이진화 방법과 Y. Kim 등이 제안한 방법[5]을 결합한 세선화를 수행하여도 Fig. 2(d)와 같이 매끄러운 선을 생성하지 못한다. 때문에 기존에 알려진 세선화된 선을 스플라인 곡선(spline curve)으로 근사화하는 과정을 도입하고자 한다. 아크 용접 비드의 심도 측정의 경우 용접 비드와 금속관이 구별이 되기 어렵다. 때문에 R. Usame-niaga 등의 방법[4]과 같이 영역을 분할하여 스플라인 곡선으로 근사화하는 대신, Fig. 2의 y축(수직축) 상에서 일정 간격으로 N 개의 제어점을 정하면 투영된 라인 레이저 빔의 중심의 수평 좌표값을 나타낼

수 있게 스플라인 곡선의 N개의 제어점을 변수로 하는 함수로 모델링한다.

최종적으로 연속된 영상에서 세선화한 결과를 가중 평균을 구하여 세선화된 선을 더욱 매끄럽게 하였다. 이는 Fig. 2(e)에서 보여주고 있다. 액체화한 금속이 굳어지면서 생성된 용접 비드는 한 점과 그 주변의 심도 값은 유사하다. 때문에 천천히 회전하는 금속관에 라인 레이저 빔을 투영하고 빠른 속도로 영상을 연속적으로 촬영한다면 연속된 영상에서 심도 값 또한 유사하다. 제안된 방법의 전체 구성도는 Fig. 3에서 보여주고 있다.

2. 본 론

2.1 절에서는 심하게 산란하는 라인 레이저 빔의 추출에 맞게 새롭게 제안하는 적응 이진화 방법에 대하여 기술한다. 2.2 절에서 투영된 라인 레이저 빔의 수평 좌표 값을 나타내는 스플라인 곡선의 수식을 제어점들의 함수로 표현하는 방법에 대하여 기술한다. 2.3절에서는 투영된 라인 레이저 빔에 스플라인 곡선이 최적화 되도록 제어점의 위치를 조절하는 방법을 기술한다. 2.4 연속된 영상에서 세선화한 곡선을 가중 평균하는 방법에 대하여 기술한다.

2.1 투영된 라인 레이저 빔의 추출을 위한 적응 이진화 방법

Fig. 2(a)와 같이 금속관과 용접 비드는 표면의 반사 특성이 달라 투영된 라인 레이저 빔의 밝기 분포와 굵기 분포에 큰 차이가 있다. 이를 하나의 기준으로 이진화하여 투영된 라인 레이저 빔 영역을 추출하면, 추출된 선이 매우 불균일한 문제가 발생한다. 이러한 문제를 해결하기 위하여, Fig. 4(a)와 같이 투영된 라인 레이저 빔을 따라 수직으로 윈도우를 움직이

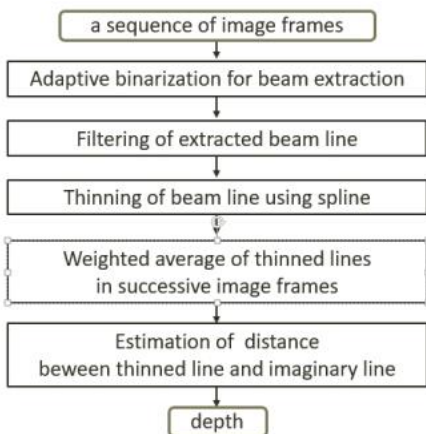
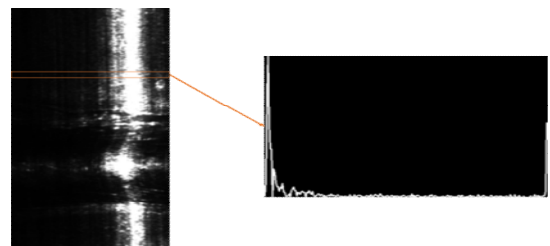


Fig. 3. The overall block diagram.



(a) a sliding window (b) the histogram in the window

Fig. 4. Sliding window and intensity histogram.

면서 윈도우 내에서 라인 레이저 빔으로 판정되는 화소의 개수를 오프라인으로 결정한 화소 개수와 동일하도록 임계값을 정한다. 임계값의 결정을 위하여, 윈도우 영역 내의 화소들의 밝기 히스토그램을 생성하고 히스토그램에서 임계값보다 밝은 화소의 개수가 오프라인으로 결정한 화소 개수와 동일하게 되는 임계값을 정한다. 화소의 개수는 영상 전체의 히스토그램을 N. Otsu 방법[9]으로 분석하여 오프라인으로 결정한다.

2.2 제어점을 이용한 스플라인 곡선의 수학적 모델링

용접 비드에 라인 레이저 빔을 투영할 때, 비드가 금속 표면으로부터 높이 올라갈수록(심도가 높아질수록) 투영된 라인 레이저 빔이 가상의 직선으로부터 멀어진다. 이 거리를 측정하여 심도를 측정하는데, 영상에서는 이 거리를 화소의 개수로 나타낸다.

투영된 라인 레이저 빔의 방향을 x축(Fig. 2에서는 수직 축)으로 하면, 비드 표면의 심도의 변화에 따라 투영된 라인 레이저 빔은 y축(Fig. 2에서는 수평 축) 좌표 값이 변화한다. N+1 개의 제어점 $((x_0, f(x_0)), \dots, (x_N, f(x_N)))$ 으로 구성되는 스플라인 곡선은 두 제어점 사이의 구간마다 별도의 다음과 같은 다항식으로 정의된다[10].

$$f_i(x) = \frac{x_i - x}{x_i - x_{i-1}} \times f(x_{i-1}) + \frac{x - x_{i-1}}{x_i - x_{i-1}} \times f(x_i) + \left(\frac{(x_i - x)^3}{x_i - x_{i-1}} - \frac{(x_i - x) \times (x_i - x_{i-1})}{6} \right) \times f''(x_{i-1}) + \left(\frac{(x - x_{i-1})^3}{x_i - x_{i-1}} - \frac{(x - x_{i-1}) \times (x_i - x_{i-1})}{6} \right) \times f''(x_i) = h_1 \times f(x_{i-1}) + h_2 \times f(x_i) + h_3 \times f''(x_{i-1}) + h_4 \times f''(x_i)$$

$$\frac{(x_i - x_{i-1})f''(x_{i-1}) + 2(x_{i+1} - x_{i-1})f''(x_i) + (x_{i+1} - x_i)f''(x_{i+1})}{6} [f(x_{i+1}) - f(x_i)] + \frac{6}{x_i - x_{i-1}} [f(x_{i-1}) - f(x_i)]$$

식(1),(2)에서 x_i 는 i 번째 제어점의 x 좌표이고, $f(x_i)$ 는 i 번째 제어점에서 심도 값이다. $f_i(x)$ 는 $i-1$ 번째 제어점과 i 번째 제어점 사이의 구간 상의 x 에서 심도 값을 나타내는 함수이다. $f''(x_i)$ 는 i 번째 제어점에서 심도 함수의 이차 미분이다. N+1 제어점의 x 좌표 (x_0, \dots, x_N) 는 사전에 오프라인에서 개수와 값이 결정되며, N+1 제어점의 심도 좌표 $(f(x_0), \dots, f(x_N))$, 이차미분 $(f''(x_0), \dots, f''(x_N))$ 는 투영된 라인 레이저 빔

에 최적화되도록 추정된다.

2.3 투영된 라인 레이저 빔에 최적화 되도록 제어점 조절

스플라인 곡선과 투영된 라인 레이저 빔의 오차 함수는 다음과 같이 정의된다.

$$Error_i = \sum_{x \in (x_{i-1}, x_i)} [y(x) - f_i(x)]^2$$

식(3)에서 $i-1$ 번째 제어점과 i 번째 제어점 사이의 구간 상의 $f_i(x)$ 는 스플라인 곡선이며, $y(x)$ 는 $i-1$ 번째 제어점과 i 번째 제어점 사이의 구간 상에 투영된 라인 레이저 빔의 좌표이다. 각 구간에서의 오차 함수를 최소화 하는 곡선은 구간의 경계에서 매끄럽게 연결되는 곡선이라는 조건에 맞지 않는다. 각 구간 사이의 제어점에서 일차 미분값이 같다는 조건을 동시에 만족시키는 오차 함수는 라그랑주 승수(Lagrange Multiplier)[11] λ_i 를 포함한 아래 수식과 같다.

$$Error = \sum_{i=1}^N Error_i + \sum_{i=1}^{N-1} \lambda_i (\alpha_i f''(x_{i-1}) + \beta_i f''(x_i) + \gamma_i f''(x_{i+1}) - \delta_i f(x_{i-1}) - \mu_i f(x_i) - \nu_i f(x_{i+1}))$$

where

$$\alpha_i = x_i - x_{i-1}, \beta_i = 2(x_{i+1} - x_{i-1}), \gamma_i = x_{i+1} - x_i, \delta_i = 6/(x_i - x_{i-1}), \mu_i = -6/(x_{i+1} - x_i) - 6/(x_i - x_{i-1}), \nu_i = 6/(x_i - x_{i-1})$$

위 오차 함수를 최소화하기 위해서는 다음의 조건을 만족해야 한다.

$$\frac{\partial L}{\partial f(x_i)} = 0, \frac{\partial L}{\partial f''(x_i)} = 0, \frac{\partial L}{\partial \lambda_i} = 0$$

식(4)를 식(5)에 대입한 후 정리하면 아래와 같이 3N+1의 미지수를 갖는 선형방정식 형태가 된다.

$$AX = B$$

where

$$X = [f(x_0), \dots, f(x_N), f''(x_0), \dots, f''(x_N), \lambda_1, \dots, \lambda_{N-1}]$$

식(6)을 풀어 구한 $f(x_0), \dots, f(x_N), f''(x_0), \dots, f''(x_N)$ 을 식 (1)에 대입하여 심도를 나타내는 스플라인 곡선을 형성한다.

2.4 연속된 영상 프레임에서 세션화된 선의 가중 평균

연속된 영상에서 세션화한 결과를 가중 평균 하여 세션화된 선을 더욱 매끄럽게 한다. 금속관이 천천히 회전하고 영상을 빠른 속도로 연속하여 촬영하여도,

연속된 영상의 동일 위치의 화소에서 심도 값은 조금씩 바뀌게 된다. 때문에 중앙의 현 영상 프레임에서 구한 세선화 결과에는 높은 가중치가 높고, 전후의 영상 프레임에서 구한 세선화 결과는 현 프레임에서 멀어질수록 가중치가 낮은 삼각 가중치 함수(triangle weight function)를 적용한다. 삼각 가중치 함수는 다음과 같다.

$$w(x) = \begin{cases} K & x = x_{center} \\ K-L & |x - x_{center}| = L \end{cases} \quad (7)$$

3. 실험 및 결과

금속 원통에 둥근 날개를 원통의 원주를 따라 아크 용접한 용접 비드의 심도를 측정하기 위하여, 원통을 분당 3.5 rpm 속도로 회전 시키면서 라인 레이저 빔을 용접 비드에 투영하고, CCD 카메라로 초당 54 fps로 영상을 촬영하였다. 카메라의 특성은 글로벌 셔터(global shutter), 1.5M pixel 해상도이다. 라인 레이저 빔 생성에 사용되는 레이저 모듈은 100 mW, 650nm이다. 광원의 폭은 0.1 mm이다. 촬영 환경은 일반 형광등 조명 환경이다. 촬영된 영상은 용접 비드 재질의 반사 특성, 비드 표면의 거친 정도, 비드 형상의 변화에 따라 레이저의 산란 정도가 다양하게 나타났다.

3.1 스플라인 제어점의 개수의 변화에 따른 평균자승오차

Fig. 5(a)에서와 같이 제어점의 개수가 5에서 10으로 증가하는 경우에는 오차가 급격히 감소하다가 그

다음부터는 조금씩 감소하다가 20에서 최소의 오차 값을 가지고, 20을 넘어서면 다시 조금씩 증가하였다.

3.2 가중 평균에 적용되는 연속된 세선화 곡선의 수의 변화에 따른 평균자승오차

금속관의 회전 속도는 일분에 3.5번 회전을 하고, 카메라 촬영 속도는 초당 54 프레임을 촬영한 실험 환경에서는, 하나의 금속관을 926 프레임으로 촬영하게 된다. 실험에 사용된 금속관은 지름이 5cm인 금속관이므로 프레임 사이의 간격은 0.17 mm가 된다. 이렇게 프레임 사이 간격이 짧은 경우 연속성이 강하기 때문에 하나의 프레임만을 사용하지 않고 여러 프레임을 합하면 더욱 안정적인 결과를 얻을 수 있다.

본 실험에서는 Fig. 5(b).에서와 같이 5개의 연속된 세선화 곡선을 가중 평균하였을 때 최소 오차값을 가진다. 5 개의 연속된 세선화 곡선의 가중 평균을 구하였을 때, 오차가 24% 개선되었다.

3.3 8개의 다른 부위에서 구한 세선화 오차

원기둥에서 원주를 따라 아크 용접한 용접 비드는 용접 부착되는 구조물의 형상에 따라 용접 비드 형상이 달라진다. 용접물에 의해 나타나는 다른 형상의 용접 비드를 8개의 샘플로 분류하고 각각의 경우에 대해 라인 레이저를 투영하여 심도를 측정하였다.

Fig. 6에서는 아크 용접이 시작되는 부위에서의 산란이 가장 심하였다. 따라서 세선화 오류도 클 수밖에 없었다. 그러나 제안한 스플라인 곡선은 전체

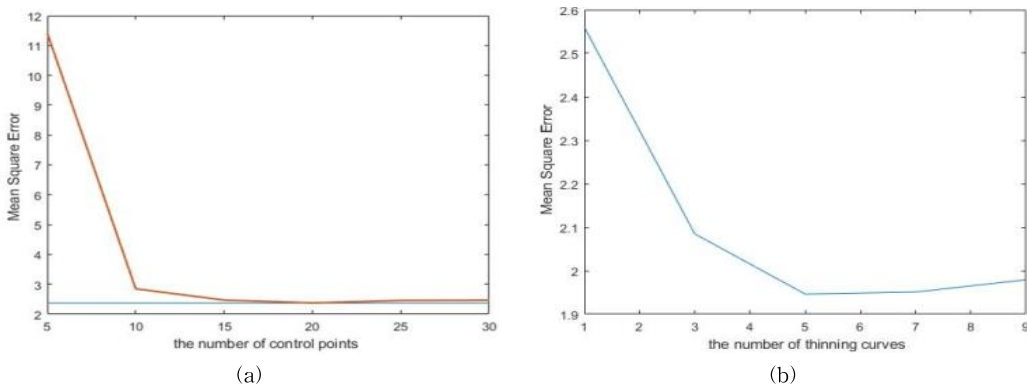


Fig. 5. Mean square error of spline curve: (a) with different number of control points, (b) weighted mean of multiple thinning curves.

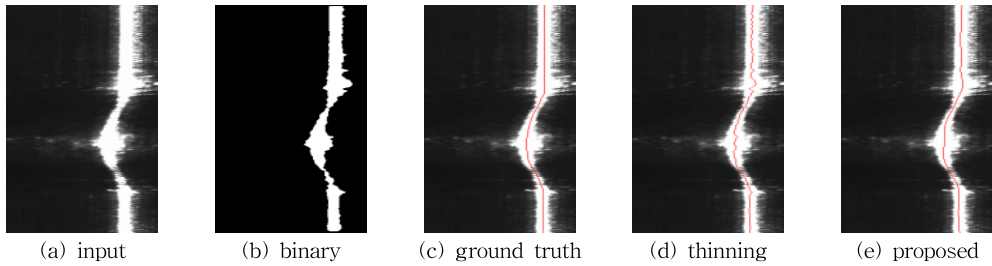


Fig. 6. Thinning result of the first image.

에러를 감소시키면 부드러운 곡선을 그려준다.

Fig. 7에서는 단차로 인해 급변하는 부분이 있어 전체 에러를 최소화하는 스플라인 곡선의 특징으로 인해 그 위 부분에 과적응하는 구간이 발생하였다. 그렇지만 전체 평균 에러는 기존 세선화 방법에 비해 줄어들었다.

8개의 샘플에 대해 실험해 보았을 때 기존의 세선화 방법에 비해 제안한 스플라인 곡선은 더 작은 에러를 가지고 세선화하며, 자연스러운 레이저 선을 보여주었다. 이는 세선화 결과에 대한 신뢰도를 높여주

고, 특별히 물체의 심도 측정과 같이 정확하면서도 노이즈가 적은 결과가 필요한 경우에 적합한 방법이다.

본 실험에서 측정하고자 하는 심도는 아크 용접한 비드의 높이로서, 세선화된 투영된 라인 레이저 빔과 가상의 선과의 거리로 측정한다. 이는 영상에서 두 선 사이에 놓여진 화소 숫자에 비례한다. 실험 환경에서 한 화소의 거리는 y 축 상에서는 0.014 mm에 해당하고, 심도에 해당하는 x 축 상에서는 0.083 mm에 해당한다. Table 1에서 제안한 방법의 평균 에러는 3.4132 pixel인데 심도의 거리-화소 비는 0.083

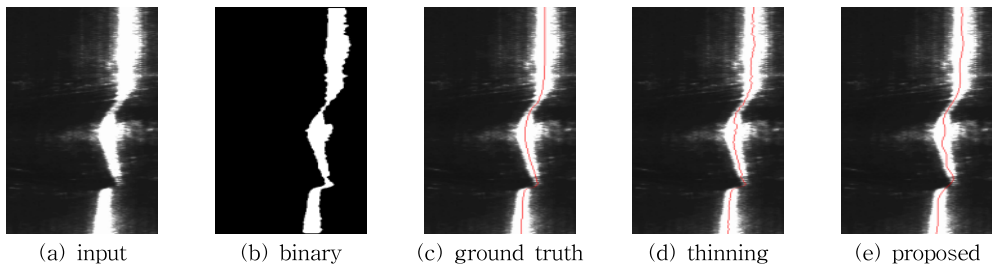


Fig. 7. Thinning result of the second image.

Table 1. Mean square error

Experiment	MSE		Standard Deviation	
	Thinning[1] ($pixel^2$)	Proposed ($pixel^2$)	Thinning[1] ($pixel$)	Proposed ($pixel$)
1	13.2253	11.5073	3.3966	3.1259
2	5.4519	4.3823	2.3359	2.0939
3	2.1129	1.5393	1.3271	1.0987
4	3.3635	2.6698	1.4859	1.1806
5	1.1564	0.9898	0.7894	0.6772
6	3.2595	2.0809	1.8066	1.4434
7	3.0766	2.1607	1.532	1.202
8	2.4071	1.9758	1.549	1.4028
Average	4.25665	3.413238	1.777813	1.528063

mm/pixel 이므로 평균 에러가 0.28 mm에 해당한다. 다른 세선화 방법[1]은 평균 에러가 0.35 mm인 것에 비해 20.6% 개선되었다.

4. 결 론

원통의 원주를 따라 아크 용접한 용접 비드의 심도를 측정하기 위하여 원통을 회전 시키면서 라인 레이저 빔을 용접 비드에 투영하고, CCD 카메라로 연속된 영상을 촬영하여 심도를 측정하는 비전 시스템에서, 라인 레이저 빔의 산란에 강인한 세선화와 이를 통한 정확한 심도 측정 방법을 제안하였다. 제안한 방법은 아크 용접 비드에서 심한 산란에도 불구하고 매끄러우면서 작은 에러를 가지는 세선화 결과를 가져옴을 실험을 통하여 보여주었다.

REFERENCE

- [1] W. Huang and R. Kovacevic "A Laser-based Vision System for Weld Quality Inspection," *Journal of Sensors*, Vol. 11, pp. 506-521, 2011.
- [2] Specification of 3D Webcam Sensor, <http://www.artcreaction.com/3d-depth-sensor/apple-primense/primense-carmine-1-09-3d-webca.html>, (accessed Jan., 06, 2017).
- [3] 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.
- [4] Y. Kim, K. Ko, S. Yeon, and J. Kim "Depth Measurement of Materials Attached to Cylinder Using Line Laser," *Journal of Korea Multimedia Society*, Vol. 20, No. 2, pp. 225-233, 2017.
- [5] M. Nixon and A. Aguado, *Feature Extraction & Image Processing for Computer Vision*, Academic Press, New York city, New York, 2012.
- [6] E.R. Dougherty and R.A. Ltufo, *Hands-on Morphological Image Processing*, SPIE Press, Bellingham, Washington, 2003.
- [7] R. Usamentiaga, J. MolledaDaniel, and D. García, "Fast and Robust Laser Stripe Ex-

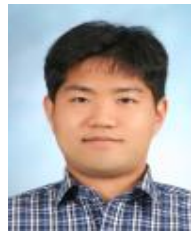
traction for 3D Reconstruction in Industrial Environments," *Machine Vision and Applications*, Vol. 23, No. 1, pp. 179-196, 2012.

- [8] Arc Welding, https://en.wikipedia.org/wiki/Arc_welding, (accessed Nov., 24, 2017).
- [9] N. Otsu, "A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol. 9, No. 1, pp. 62-66, 1979.
- [10] R.L. Burden, J.D. Faires, and A.M. Burden, *Numerical Analysis*, Cengage Learning, Boston, 2016.
- [11] Lagrange Multiplier, https://en.wikipedia.org/wiki/Lagrange_multiplier, (accessed Nov., 24, 2017).



고 광 진

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



김 재 민

1980년~1984년 서울대학교 전기
공학과 학사
1984년~1986년 서울대학교 전기
공학과 석사
1989년~1994년 Rensselaer
Polytechnic Institute
전기공학과 박사

관심분야: 영상처리, 패턴인식, 컴퓨터비전, 딥러닝