

레이저 구조광을 이용한 로봇 목표 추적 방법

Robot Target Tracking Method using a Structured Laser Beam

김 중 형*, 고 경 철
(Jong Hyeong Kim^{1,*} and Kyung-chul Koh²)

¹Department of Mechanical System Design Engineering, Seoul National University of Science and Technology

²Department of Information and Communication Engineering, Sunmoon University

Abstract: A 3D visual sensing method using a laser structured beam is presented for robotic tracking applications in a simple and reliable manner. A cylindrical shaped laser structured beam is proposed to measure the pose and position of the target surface. When the proposed laser beam intersects on the surface along the target trajectory, an elliptic pattern is generated. Its ellipse parameters can be induced mathematically by the geometrical relationship of the sensor coordinate and target coordinate. The depth and orientation of the target surface are directly determined by the ellipse parameters. In particular, two discontinuous points on the ellipse pattern, induced by seam trajectory, indicate mathematically the 3D direction for robotic tracking. To investigate the performance of this method, experiments with a 6 axis robot system are conducted on two different types of seam trajectories. The results show that this method is very suitable for robot seam tracking applications due to its excellence in accuracy and efficiency.

Keywords: structured light, laser beam, robot tracking, ellipse pattern

I. 서론

시각센서를 이용한 로봇의 응용 작업은 산업현장에서의 편의성과 정밀도를 높이고 생산성을 증대시킬 수 있는 방법으로 많은 연구가 되어왔다. 로봇의 작업에 시각센서를 이용해 대상물체의 3차원 정보를 얻는 방법으로는 사람의 눈과 같이 2대의 카메라를 일정한 거리를 두고 배치하는 스테레오 비전시스템[1], 한 대의 카메라와 한대의 특정한 패턴을 가진 광원을 사용하여 측정하는 구조광 시스템(structured light system)을 대표적으로 꼽을 수 있다.

시각 센서를 이용한 산업용 로봇의 작업은 보통 로봇의 엔드이펙트(end-effector)에 카메라를 장착하여 작업 대상과 엔드이펙트 사이의 상대적인 위치 및 방향정보를 얻음으로써 이루어진다. 이러한 대상물체의 3차원 정보를 인식하는 대표적인 방식으로는 2대의 카메라를 이용한 스테레오 비전시스템과 특정한 패턴의 광원과 한 대의 카메라로 구성되는 구조광 시스템을 들 수 있다.

이중에서 스테레오 비전시스템은 2대의 카메라의 시선이 일치하는 점을 계산하여 3차원 정보를 얻어낼 수 있으나 각 카메라의 영상 좌표를 일치시키는데 상당한 처리시간이 걸리므로 산업용 로봇 비전 분야에 사용하기에는 제약이 있다[2].

구조광 시스템은 광삼각법[3]을 이용하여 3차원 정보를 계산하는 방식으로 시스템의 구성이 간단하며 처리시간이 빠르다는 장점으로 인해 검사 및 측정, 로봇응용 분야에 많이 사용되고 있다. 특히 산업용 로봇의 응용작업분야에서 구조광 시스템은 로봇의 엔드이펙트 에 부착되어 3차원 거리와

방향정보를 얻어냄으로써 용접선 추적, 도장(spray painting), 거리 측정, 결함 검출, 물체 취급 등의 다양한 작업이 가능하며 이에 따라 점, 선, 망, 원 등의 다양한 패턴의 빔(beam)을 이용해 3차원 정보를 얻는 방법이 연구된바 있다.

Steven J. Gordan [4]은 로봇의 3차원 데이터 및 용접선 이음매 측정 작업에 레이저 선 투사 방법을 사용하였다. 선 모양은 구조광 시스템에서 가장 많이 쓰이는 패턴중의 하나로 측정시간이 빠르고 캘리브레이션이 간단하다는 장점이 있으나 검출영역이 점과 선으로 제한되어 있어 측정 면의 법선 벡터의 계산이 불가능하다. 또한 특정 영역의 형상을 알기 위해서는 스캐닝이 필요해 전체적인 작업 처리시간이 길어지는 단점을 가지고 있었다.

Y. F. Wang, A. Mitiche와 J. K. Aggarwal [5]은 망 패턴을 이용한 방식을 제시하였다. 이 방법은 각 망 교차점들에서 3차원 정보를 얻어낼 수 있는 방법으로 한 번에 많은 정보를 얻어낼 수 있다는 장점이 있으나 돌출하거나 복잡한 환경에서는 격자의 교차점을 찾기가 어려운 단점이 있다. 이를 해결하기 위해 다양한 색의 선 빔을 투사 하거나 빠르게 망의 형태를 바꾸면서 교차점을 찾는 방식을 사용하였으나 계산이 복잡하며 처리시간이 증가하는 경향이 있었다. O. Duran, K. Althofer와 L. D. Seneviantne [6]는 원뿔 형상의 빔을 이용하여 파이프나, 하수관 검사에 사용하였다. Kim 등 [7]은 원형 빔을 사용하여 표면의 3차원 자세 및 거리를 측정하는 방법과 오차에 대한 해석을 했다. Shin과 Yi [8]는 선형의 레이저 빔을 이용하여 이동형 모바일 로봇의 경로 인식을 연구하였다. 이처럼 다양한 레이저 구조광을 이용한 광삼각법들이 연구되어왔다.

다양한 로봇의 응용 작업에 구조광 시스템이 사용되기 위해서는 더욱 발전된 기능, 즉 로봇에 장착이 적합하도록 가볍고 소형이며 작업의 속도를 높일 수 있도록 3차원 거리와 방향 정보의 빠른 처리 능력이 필요하다. 이러한 요구조건을

* Corresponding Author

Manuscript received August 20, 2013 / revised September 15, 2013 / accepted October 4, 2013

김중형: 서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과
(johnkim@seoultech.ac.kr)

고경철: 선문대학교 정보통신공학과(kckoh@sunmoon.ac.kr)

※ 본 연구는 서울과학기술대학교 교내연구비에 의하여 연구되었음.

충족시킬 수 있는 센서시스템과 이를 이용한 로봇의 응용작업에 대한 연구가 필요할 것이다.

본 논문에서는 용접선 추적 과 같은 로봇 응용 작업에 유용한 원형 레이저 빔을 사용하여 작업 면까지의 거리와 자세 정보를 파악하고, 용접선과 같은 특정한 불연속 점을 인식하는 방법을 제안하고자 한다. 기하학적 모델을 유도하고 센서 캘리브레이션 및 3차원 측정 기법을 제안하였다. 또한 이를 기반으로 가볍고 소형의 센서 시스템을 제작하였으며 여기서 얻어지는 영상을 이용해 노이즈에 강건한 특성을 갖는 영상처리 및 로봇의 추적 작업을 수행함으로써 이 센서 시스템이 실제 로봇의 응용 작업에 유용함을 보이고자 한다.

II. 센서 시스템

센서 시스템은 그림 1과 같이 원형의 빔을 만드는 레이저 광학부 그리고 비전 카메라로 구성되어 있다. 영상 상의 좌표값과 실제 대상물의 좌표값 사이의 관계를 만들고자 기하학적 모델을 유도하고자 한다. 이를 위해 3개의 좌표계를 그림 1에서와 같이 영상 좌표계 $\{I\}$, 레이저 좌표계 $\{L\}$, 그리고 대상물에 붙어 있는 대상물 좌표계 $\{O\}$ 를 정의 한다.

영상 좌표계 $\{I\}$ 는 기준 좌표계로서, 원점이 카메라 중심에 위치하고 있으며, $^I Z$ 축은 카메라 주축과 일치한다. 그리고 $(^I X, ^I Y)$ 평면상의 영상 좌표는 (u, v) 로 표현하였다.

다른 좌표계는 영상 좌표계 $\{I\}$ 를 기준으로 4×4 homogeneous transform을 이용하여 정의하고자 한다. 레이저 좌표계 $\{L\}$ 은 영상 좌표계 $\{I\}$ 로부터 $^I Z$ 축에서 각도 ϕ 만큼 회전하고 $^I X$ 축을 따라서 d 만큼 이동한 것으로 정의 한다. 따라서, 좌표계 $\{L\}$ 은 ϕ 와 d 값을 알면 $\{I\}$ 를 기준으로 정의 할 수 있다. 두 좌표계 간의 관계를 식 (1)의 homogeneous transform matrix를 통해서 보여 줄 수 있다.

$${}^I T = \left[\begin{array}{c|c} ROT(^I Y, \phi) & TRANS(^I X, d) \\ \hline 0 \ 0 \ 0 & 1 \end{array} \right] \quad (1)$$

대상물 좌표계 $\{O\}$ 는 대상물 표면에 측정의 중심에 위치하는 것으로 대상물이 레이저 좌표계 $\{L\}$ 에 대해서 상대적으로 정의 할 수 있다. 우선 $\{L\}$ 을 $^I Z$ 에 대해서 각도 α 만큼 회전하고 다시 $^I Y$ 에 대해서 β 만큼 회전시킨 다음에 $^I Z$ 을 따라서 h 거리 만큼 이동 시켰다고 정의 한다. 그러면 두 좌

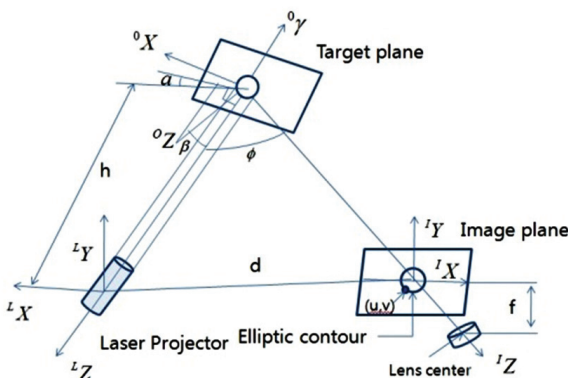


그림 1. 센서 시스템 좌표계.
Fig. 1. Sensor system coordinate.

표계 $\{O\}$, $\{L\}$ 사이에는 식 (2)의 homogeneous transform matrix 가 정의 된다.

$${}^L T = \left[\begin{array}{c|c} ROT(^L Z, \alpha) ROT(^L Y, \beta) & TRANS(^L Z, h) \\ \hline 0 \ 0 \ 0 & 1 \end{array} \right] \quad (2)$$

식 (1)과 식 (2)로부터 당초에 의도했던 영상 상의 좌표값과 실제 대상물의 좌표값 사이의 관계를 식 (3)과 같이 구할 수 있다.

$${}^I T = {}^I T {}^L T \quad (3)$$

카메라 모델을 단순한 핀 홀 모델로 적용할 경우, 다음과 같은 일종의 homogeneous transform matrix를 정의 할 수 있고 이를 투영 변형 매트릭스(perspective transformation matrix)라고 하고 식 (4)와 같이 정의한다.

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1/f & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

여기서 f 는 초점거리이다. 이러한 관계로부터 대상물 좌표계의 임의의 점 $(^O X, ^O Y, ^O Z)$ 은 영상상의 좌표값 (u, v) 로 식 (5)와 같이 표현될 수 있다. 또한, 반대로 영상상의 좌표값으로 대상물 좌표계의 값을 알아 내기 위해서는 여전히 z 값을 알아야 지만 하다. 이것은 또 다른 매개변수가 있어야 식 (5)의 역을 완성할 수 있다는 의미이다. 여기서 k 는 스케일 값이다.

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ z \\ k \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} ^I x \\ ^I y \\ ^I z \\ 1 \end{bmatrix} = M {}^I T \begin{bmatrix} ^O x \\ ^O y \\ ^O z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

따라서 대상물의 좌표계에서 특정한 관계를 가진 점들만이 영상 좌표계와 연계될 수 있다. 다음은 그림 1에서처럼 레이저에서 원형 빔을 만들어 투사할 때, 대상물의 좌표계에 생기는 타원의 패턴은 식 (6)으로 표현될 수 있다.

$$\frac{1}{\sqrt{p^2 + q^2 + 1}} ({}^O x^2 + {}^O y^2) = r^2, \quad {}^O z = 0 \quad (6)$$

여기서 p, q 는 대상물 좌표계에서 Z 축 벡터의 변수로서 식 (7)과 같이 경사도 공간(gradient space) 상에서 정의될 수 있다.

$$\begin{aligned} O_z = \vec{n} &= p\vec{i} + q\vec{j} + \vec{k} \\ &= (\cos \alpha \tan \beta)\vec{i} + (\sin \alpha \tan \beta)\vec{j} + \vec{k} \end{aligned} \quad (7)$$

여기서 r 은 원형 빔의 반지름이다. 또한 이 타원 패턴은 대상물의 표면에 붙어 있으므로 z 의 값은 항상 "0"이다.

대상물 표면의 타원 패턴 상에 있는 점은 식 (5)를 통하여 일치하는 영상 상의 값과의 관계를 식 (8)과 같이 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned} {}^O x &= (ub \cos \alpha + vb \sin \alpha \cos \phi - h \cos \alpha \sin \phi) / a \\ {}^O y &= \{-ub \sin \alpha \cos \beta + vb(\cos \phi \cos \alpha \cos \beta - \sin \phi \sin \beta) \\ &\quad + h \sin \alpha \cos \beta \sin \phi\} / a \end{aligned} \quad (8)$$

여기서 a, b 는 다음과 같이 정의된다.

$$a = (\cos \phi \cos \alpha \cos \beta - \sin \phi \sin \beta) \cos \alpha + \sin^2 \alpha \cos \phi \cos \beta$$

$$b = (d - h \cos \phi + f) / f$$

즉 식 (8)은 대상물 표면의 타원의 패턴 위에 있는 점들로 한정되므로 식 (8)을 식 (6)에 대입하면 영상 상에서의 타원의 방정식을 식 (9)와 같이 구할 수 있다.

$$u^2 + w_1 v^2 + w_2 uv + w_3 u + w_4 v + w_5 = 0 \quad (9)$$

식 (9)의 타원의 변수 $w_i (i=1, 2, 3, 4, 5)$ 은 다음과 같이 정의된다.

$$w_1 = \cos^2 \phi + (p^2 + q^2) \sin^2 \phi - 2p \sin \phi \cos \phi$$

$$w_2 = 2q \sin \phi$$

$$w_3 = -2 \left(\frac{d - h \sin \phi}{fh \cos \phi + 1} \right)$$

$$w_4 = 2q \sin \phi \left(\frac{d - h \sin \phi}{fh \cos \phi + 1} \right)$$

$$w_5 = \frac{r^2 (\cos \phi - p \sin \phi)^2 - (d - h \sin \phi)^2}{(fh \cos \phi + 1)^2}$$

여기서 변수들을 살펴보면, w_i 는 영상 상의 타원의 점들로부터 최소자승법 (least square method)을 이용하여 구할 수 있다[9]. 카메라와 레이저가 이루는 각도 ϕ , 두 개의 거리 d , 카메라의 초점 거리 f , 원형 빔의 반지름 r 은 주어지는 값이므로 캘리브레이션을 통하여 구할 수 있는 변수들이다. 미지수는 대상물 표면 법선 벡터의 성분인 (p, q) 그리고 레이저 좌표계에서 대상물까지의 거리 h 는 최소자승법에서 얻어진 \hat{w}_i 으로부터 구할 수 있다.

$$p = \left[\frac{1}{\tan \phi \leftarrow \sin \phi} \sqrt{\hat{w}_1 - \hat{w}_2^2 / 4} \right] \quad (10)$$

$$q = \frac{\hat{w}_2}{2 \sin \phi}$$

식 (10)에서 보듯이 대상물의 법선 벡터는 \hat{w}_1 와 \hat{w}_2 의 2개 변수에 좌우된다. 즉 대상물 표면에 있는 타원 패턴의 장단축의 비에 좌우됨을 알 수 있다.

$$h = \frac{\hat{w}_3 (d + f)}{\hat{w}_3 \cos \phi - 2f \sin \phi} \quad (11)$$

거리 h 는 식 (11)과 같이 \hat{w}_3 변수에 좌우되는데, 이는 영상 상에 있는 타원의 위치와 관련이 된다. 즉 레이저 좌표계에서 대상물이 가까이 멀리 있음에 따라 영상 상의 타원 패턴의 위치도 왼쪽에서 오른쪽으로 변화한다.

다음은 대상물 표면의 융접선과 같은 특징 점들을 추적하기 위한 방법이다. 예를 들면, 원통형 빔을 융접선이 있는 평면 상에 투사했을 때, 타원 패턴 중간에 불연속 또는 찌그러진 패턴의 변화가 생긴다. 이 변형은 직접적으로 영상면에서의 위치를 쉽게 찾아낼 수 있고, 또한 그 점까지의 3차원 정보를 다음과 같이 알 수 있다.

홈집 위치에 대한 3차원 인식 방법은 다음과 같다. 식 (10)과 식 (11)에서 대상물까지의 거리 h 와 자세 (α, β) 를 구했고, 영상상에서의 홈집의 좌표 값 (u, v) 를 안다고 가정하면, 식 (8)에 의해 일치하는 대상물의 3차원 정보 $({}^o x, {}^o y)$ 를 구할 수 있다.

$${}^o P = ({}^o x, {}^o y, 0, 1) \quad (12)$$

$${}^l P = {}^l T \cdot {}^o P \quad (13)$$

이 $({}^o x, {}^o y)$ 좌표를 벡터 형식으로 나타내면 좌표는 식 (12)와 같이 되고 식 (12)와 식 (2)를 이용하면, 레이저 좌표계에서 홈집이 있는 점 ${}^o P$ 까지의 좌표점 ${}^l P$ 를 구할 수 있다. 이를 로봇 제어기에 전달하여 홈집에 대한 여러 작업을 시행할 수 있다.

III. 로봇 트래킹을 위한 실험 및 토의

그림 2는 로봇 트래킹 실험을 위해서 구성된 실험 세트이다. 로봇은 일본의 덴소 6축 수직다관절 로봇을 사용하였다. 로봇의 절대정밀도는 ± 2 mm이고, 부하 무게는 3.5Kg이다. 대략 센서 부의 무게가 1Kg 정도이므로 안전한 범위 내이다.

측정용 센서는 그림 3과 같이 레이저와 원형 빔을 만드는 광학계와 CCD 카메라가 미리 정밀하게 가공된 장치에 고정되어 있다. 광학계 및 비전 시스템의 재세한 사양은 표 1에 표시하였다. 680nm의 파장을 가진 레이저 빔이 측정하고자 하는 대상물에 원형으로 빔을 방출하여 비추고, 물체에 반사되어 돌아오는 빛은 같은 파장대의 밴드 패스 필터(Band pass

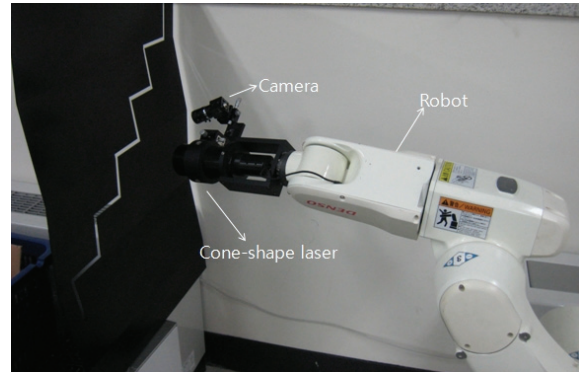


그림 2. 로봇 트래킹을 위한 실험 장치.

Fig. 2. Experimental set-up for robotic tracking.



그림 3. 레이저와 카메라로 구성된 측정용 센서.

Fig. 3. Sensor module with laser and camera.

표 1. 광학계의 사양.

Table 1. The Specification of the optical device.

| 구성요소 | 사양 (specification) |
|---------------|---|
| CCD 카메라 | 모델명 : sony社 xc-st50 해상도 : 768(H) x 494(V) |
| 렌즈 | Focal distance : 6mm Field of view : 42.3° x 54.6° |
| 필터 | 660nm Bandpass filter |
| 빔 생성기 | Stocker yale社 SNF501L series Wavelength : 660nm Diode power : 35mw Pattern : single circle |
| Frame Grabber | 모델명 : Matrox社 Meteor2/MC Sampling rates : 30MHz |

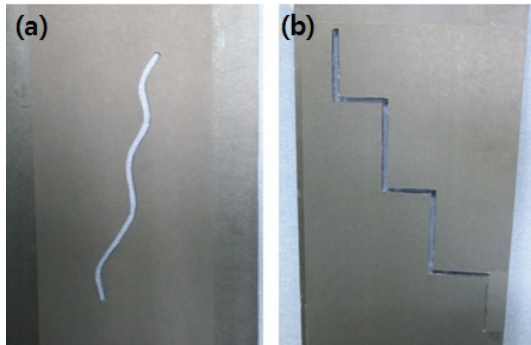


그림 4. 용접선 추적용 시료 판.

Fig. 4. Experimental plate for seam tracking.

filter)를 거쳐 카메라로 들어와 흑백영상의 형태로 얻어지게 된다. 카메라는 흑백 CCD카메라로 해상도는 768(H) x 494(V)이며 초점거리가 6mm인 렌즈를 장착하여 사용하였다.

본 실험의 목적은 본 센서가 로봇과 협력하여 얼마나 용접선의 3차원적 위치를 잘 찾고 궤적을 잘 만드느냐를 살펴보고자 한다. 본 실험에서는 로봇에 장착된 센서가 작업 전에 용접선을 추적하여 자동으로 궤적을 만들어 주는 과정을 보여 주고자 한다.

본 실험의 특징은 비록 용접선에 대한 사전 정보가 없더라도 센서가 이를 추적하여 용접선의 정보를 찾는 것이 핵심이다. 이들 정보를 기반으로 로봇의 궤적을 생성하고, 실제 궤적과 얼마나 벗어났는지 오차를 분석하였다.

대상물은 용접선 추적 작업과 유사하게 그림 4와 같이 만들었다. 대부분의 용접 작업은 직선과 곡선의 혼합으로 구성되었다고 가정하여 본 실험에서 용접선의 형상은 계단형 직선과 곡선형 두 가지에 대하여 실험하였다. 용접선은 평면상에 있으며, 용접선 이음매의 폭은 15mm이고, 용접선 전체 길이는 대략 1400mm 정도이다.

그림 5는 용접선 위에 r=15mm의 원형 레이저 구조광이 투사된 사진이다. 용접선 이음매에 의해 광 패턴이 끊어진 것을 확인할 수 있다. 용접선을 왼쪽에서 오른쪽으로, 위에서 아래로 스캔한다면, 그림 6과 같이 시작점과 끝점을 정의할 수 있고, 영상 상에서 쉽게 구할 수 있다. 로봇은 원형 빔의 중심점을 시작점에서 끝점 방향으로 반지름 r만큼 이동하였다. 실험에서는 50 단계를 진행하였다.

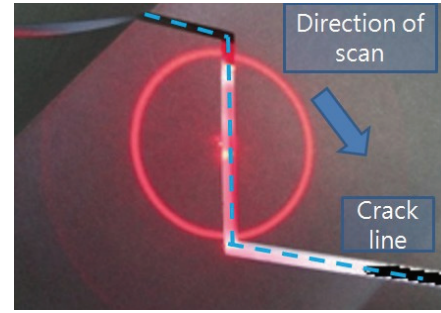


그림 5. 용접선 이음매에 투사된 원형 빔.

Fig. 5. Projected ring beam on seam.

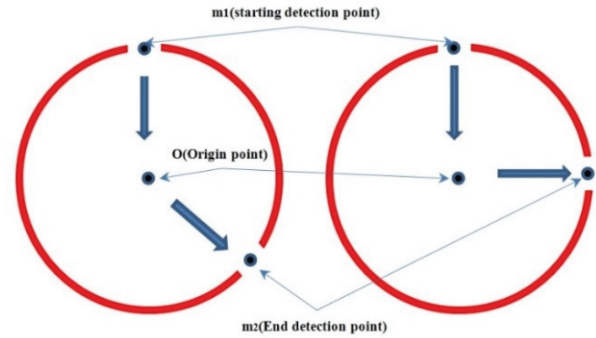


그림 6. 시작점과 끝점 및 트래킹 방향.

Fig. 6. Start and end points, tracking direction.

시작점에서 각 단계마다 얼마나 촘촘하게 측정하며 가는지에 따라서 용접선 궤적을 따라가는 정확도는 높아지고 반면에 속도는 느려진다. 측정 간격이 듬성듬성하면 정확도는 낮지만 추적 속도는 빨라진다. 그림 7은 한 단계 내에서 측정 회수에 따라 실제 용접선 궤적과의 계산된 중심점이 이루는 궤적과의 오차를 식 (14)와 같이 계산하였다.

$$error = \sqrt{(x - \hat{x})^2 + (y - \hat{y})^2 + (z - \hat{z})^2} \quad (14)$$

그림 7은 그림 4(a) 유선형 용접선을 추적한 결과이다. 그림 7(a)는 시료 판의 한 단계 내에서 1회 측정된 경우이고, 그림 7(b)는 2회 측정, 그림 7(c)는 3회 측정된 결과이다. 3회 측정된 경우가 당연히 오차가 작은 것을 예상할 수 있다.

표 2는 이 세 경우의 평균 오차를 계산하였다. 최대 오차가 원형 빔의 반지름에 비해 충분히 작은 것을 알 수 있다. 이것의 의미는 용접선의 변화가 항상 이 원형 빔 내에서 있고, 용접선의 3차원 위치를 항상 측정할 수 있다는 것이다.

표 3은 그림 4(b)의 계단형 용접선을 추적한 결과 샘플링 횟수 각 3가지 경우에 대한 오차의 결과이다. 곡선 용접선에 비해서 오차가 큰 것을 알 수 있는데, 이는 특히 수평에서 수직으로의 90°의 방향 전환 때에 오차가 커지는 것을 확인할 수 있었다. 계단형과 같이 방향 전환이 많은 용접선에 대해서는 측정 샘플링 회수를 늘려서 해야 오차를 줄일 수 있다.

1차로 추적을 하면서 용접선의 3차원 좌표 데이터를 저장할 수 있도록 하면, 이 데이터를 기준으로 로봇의 이동경로 및 가감속 프로파일을 생성하여 부드럽고 빠른 반복작업을 할 수 있었다.

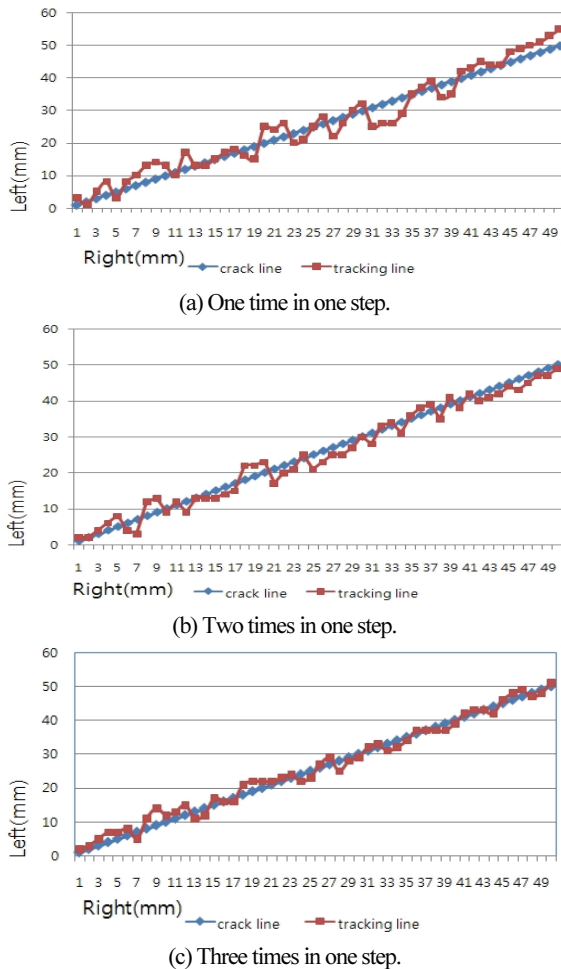


그림 7. 유선형 seam에 tracking 결과.

Fig. 7. Tracking error for curved seam.

표 2. 곡선 seam tracking의 sampling에 따른 오차 값.

Table 2. Error for curved seam tracking with sampling number.

| Sampling 회수 | 평균오차(mm) | 최대 오차(mm) |
|-------------|----------|-----------|
| 1 | 2.75 | 7 |
| 2 | 2.06 | 5 |
| 3 | 1.64 | 5 |

표 3. 계단형 seam tracking의 sampling에 따른 오차 값.

Table 3. Error for stepped seam tracking with sampling number.

| Sampling 회수 | 평균오차(mm) | 최대 오차(mm) |
|-------------|----------|-----------|
| 1 | 3.46 | 9 |
| 2 | 2.20 | 6 |
| 3 | 3.46 | 3 |

IV. 결론

본 논문에서는 원형 레이저 빔을 사용하여 작업 면까지의 거리와 자세 정보를 파악하고, 용접선 이음매와 같은 특정한 불연속 점을 인식하여 로봇이 추적하는 방법을 보여 주었다.

구조화된 원형 빔이 만든 대상물 표면의 타원 패턴에 대한 기하학적 모델을 유도하고, 타원 패턴의 불연속 점 또는 흠집의 3차원 좌표를 구하였다. 본 논문에서는 곡선과 계단형 용접선을 대상으로 추적 작업을 실행하고 이에 따른 오차를 분석하였다.

본 제안한 방법은 로봇의 엔드이펙트와 대상물과의 자세와 거리가 중요한 로봇 작업에 적용될 수 있다. 예를 들면, 용접선을 따라서 용접하는 로봇 작업, 대상물과 수직으로 자세를 이루며 도장하는 로봇 작업, 그리고 주물 표면의 잔유물 버(burr)를 제거하는 로봇 작업 등에 활용될 수 있다.

REFERENCES

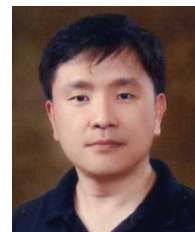
- [1] H. I. Kim and G. S. Kim, "Development of a robot's visual system for measuring distance and width of object algorithm," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 17, no. 2, pp. 88-92, 2011.
- [2] K. C. Lim, "Dimensional measurement of 3-D objects through stereo-metric image processing," *Korea Advanced Institute of Science and Technology*, 1985.
- [3] C. P. Day, "Robot accuracy issues and methods of improvement," *Robotics Today*, vol. 1, Spring 1988.
- [4] S. Gordon and W. Seering, "Locating polyhedral features from sparse light stripe data," *Proc. of IEEE Robotics and Automation*, pp. 801-806, 1987.
- [5] Y. F. Wang, A. Mitiche, and J. K. Aggarwal, "Computation of surface orientation and structure of objects using grid coding," *IEEE, Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence archive*, vol. 9, pp. 129-137, 1987.
- [6] O. Duran, K. Althoefer, and L. D. Seneviratne, "State of the art in sensor technologies for sewer inspection," *IEEE Sensors Journal*, vol. 2, no. 2, pp. 73-81, Apr. 2002.
- [7] J. H. Kim, H. S. Cho, and S. K. Kim, "Visual measurement of a 3-D plane pose by a cylindrical structured light," *Proc. of International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1845-1850, 1993.
- [8] J. Shin and S.-Y. Yi, "Ring array of structured light image based ranging sensor and autonomous navigation for mobile robot," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 18, no. 6, pp. 509-611, 2012.
- [9] Press, William H, "Numerical Recipes in C: The Art of Scientific Computing," Cambridge, 1992.



김종형

1984년 서울대학교 공과대학 기계설계공학과(공학사). 1989년 한국과학기술원 생산공학과(공학석사). 1995년 한국과학기술원 기계공학과(공학박사) 1993년~2002년 삼성전자 생산기술센터 부장. 2002년~현재 서울과학기술대학교 교수.

2012년~현재 제어로봇시스템학회 교육이사. 관심분야는 머신비전, 인공지능, 로봇 응용.



고경철

1982년 연세대학교 기계공학과(공학사). 1984년 한국과학기술원 기계공학과(공학석사). 1994년 한국과학기술원 정밀공학과(공학박사). 1983년~1988년 LG전자 중앙연구소 선임연구원. 1993년~1998년 LG산전 안양연구소 책임연구원. 1998년~현재 선문대학교 정보통신공학과 교수 관심분야는 robotics, 제어, 의료로봇.