

원격 레이저 용접 로봇을 위한 형상 측정 센서의 개발과 응용

김창현, 최태용, 이주장
한국과학기술원 전자전산학과¹

서정, 박경택, 강희신
한국기계연구원²

Development and Application of a Profile Measurement Sensor for Remote Laser Welding Robots

Chang-Hyun Kim, Tae-Yong Choi, Ju-Jang Lee

¹Department of Electrical Engineering, KAIST

Jeong Suh, Kyoung-Taik Park, and Hee-Shin Kang

²Korea Institute of Machinery and Materials (KIMM)

Abstract

A new profile measurement sensor was developed for remote laser welding robots. A stripe laser and a vision camera are used in the profile sensor. A simple sensor guided control scheme using the developed sensor is also introduced. The sensor can be used to guide the welding head in the remote welding application, where the working distance reaches to 450mm. In experiments, the profile measurement and the seam tracking were carried out using the developed sensor.

Key Words: Remote laser welding, vision sensor, profile measurement, seam tracking

1. 서론

원격 용접에서는 기존의 레이저 용접과 비교하여 레이저 용접부가 시간 손실이 거의 없이 점프를 할 수 있어, 움직이는데 필요한 공정외 시간을 줄일 수 있다. 특히, 로봇에 레이저 용접헤드와 스캐너가 장착된 원격 용접 시스템에서는 로봇이 타 용접부 근처로 이동만을 수행하고 스캐너가 세부적인 용접형태에 따라 고속 용접을 수행하여 보다 넓은 범위의 대상에 대해 고품질의 용접을 가능케 한다.¹

일반적인 원격 용접에서는 주로 겹치기 이음매를 대상으로 로봇의 움직임 중에 용접이 이루어진다. 이는 작업물에 대한 레이저 빔의 구현 가능한 위치 정밀도에 한계가 있기 때문이다. 그러나 일부 차체 부품에서는 맞대기, 채우기, 코치 용접 등이 필요하며, 이러한 용접부위에 원격 용

접을 적용하기 위해서는 모서리 검출(혹은 용접선 추적) 시스템이 필요하다.²

이러한 목적을 가지는 센서에는 여러 종류가 있는데, 비접촉식 방법으로 비전 센서가 많이 이용된다. 대부분의 센서는 구조화된 빔과 이미지 센서로 구성되어 있으며, 주로 광삼각법을 이용하여 형상정보를 추출한다. 가장 간단한 형태가 선형의 빔을 이용하는 방법이다.^{3,5} 이외에 세 개의 라인으로 이루어진 삼각형⁶이나 원형⁷의 빔을 사용하는 방법이 이용되기도 하였다. 기존의 상용품들의 경우에는 그 정밀도가 수십 μm 에 이르는 것이 있다. 하지만, 여전히 가격이 비싸며 대부분 고정된 형태의 구조로 작동거리(Working Distance: 모재에서부터 센서까지의 거리)의 제한이 있다.

본 연구에서는 형상 측정 및 용접선 추적 기능을 포괄하는 형상 측정 센서의 개발에 대해 다루게 된다. 특히, 원격 용접 시스템에 적합하도록

구조를 변경하여 비교적 먼 거리까지 작동거리의 변경이 가능한 형상 측정 센서에 대해 설명한다. 또한, 개발된 센서를 용접 로봇에 적용하여 제어하는 방법에 대해 소개하도록 한다.

2. 형상 측정 센서

Fig. 1에 도식한 것과 같이 전체 시스템은 카메라, 렌즈, 레이저 다이오드와 해당 레이저 영상만을 통과시키는 대역필터가 사용되었다. 원격 환경에서의 다양한 작동거리에서 작동할 수 있도록 그림처럼 모재와의 거리에 따라 레이저 다이오드와 카메라간의 위치를 조절해야하며, 해당 작동거리에서 선명한 영상취득과 원하는 정밀도를 위해 카메라의 초점과 줌 기능을 조절하도록 설계되었다.

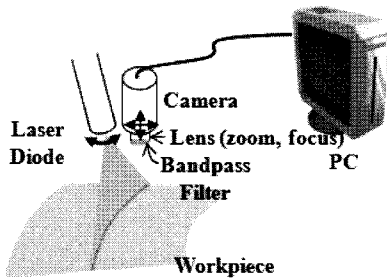


Fig. 1 Configuration of the welding profile sensor.

45°로 퍼지는 선형태의 레이저 빔을 사용하며, 특수 설계된 광학부로 중심부와 바깥쪽에서 레이저 빔의 밝기가 균일하게 레이저 선을 생성할 수 있어 보다 강인하고 손쉬운 영상처리를 가능케 한

다. IEEE1394 인터페이스를 이용하여 메인 컴퓨터와 연결되며 최대 640 × 480의 해상도로 최고 200 fps(frame per second)까지 지원하는 카메라를 사용하여 영상 획득시 떨림이 적은 이미지를 획득할 수 있다. 렌즈는 6배 줌렌즈를 사용하였으며 모터 내장 버전으로 자체적으로 줌, 초점, 조리개를 조절할 수 있으며, 영상처리 시 노이즈를 줄이기 위해 렌즈 앞부분에 형상 측정시 사용되는 635 nm의 레이저 광만을 통과시키는 밴드패스 필터를 부착하였고, 용접대상물에 의한 난반사를 줄이기 위해 추가로 편광필터를 적용하였다. 레이저 다이오드 위치 조절을 위해 엔코더가 내장된 소형 DC 모터를 장착하였고, 깊이 정밀도를 높이기 위해서 레이저 다이오드를 기구부 외곽으로 배치하여 약 80도의 작동 범위를 확보하였다. 이렇게 함으로서 50 mm - 500 mm에 이르는 광범위한 작동거리에 대응이 가능하다. 모터의 회전축이 센서 몸체에 고정되고 레이저 다이오드가 모터위에 놓인 형태의 직접 연결방식을 택하였기 때문에 백래쉬 없이 보다 정밀한 제어가 가능하게 된다. 최종 제작된 센서를 Fig. 2에 나타내었다.

형상 측정을 위해서는 우선 카메라로 들어오는 레이저 띠 영상으로 표면에 해당하는 점들을 추출하여야 한다. 여기서는 무게중심법을 통해 다음과 같이 표면 점들을 구한다.

수평방향과 수직(혹은 깊이)방향 좌표를 각각 u, v 라고 하면, 어떤 수평방향 u 에서의 무게중심이 되는 점은

$$v_{COG} = \frac{\sum_v I(v) \times v}{\sum_v I(v)}$$

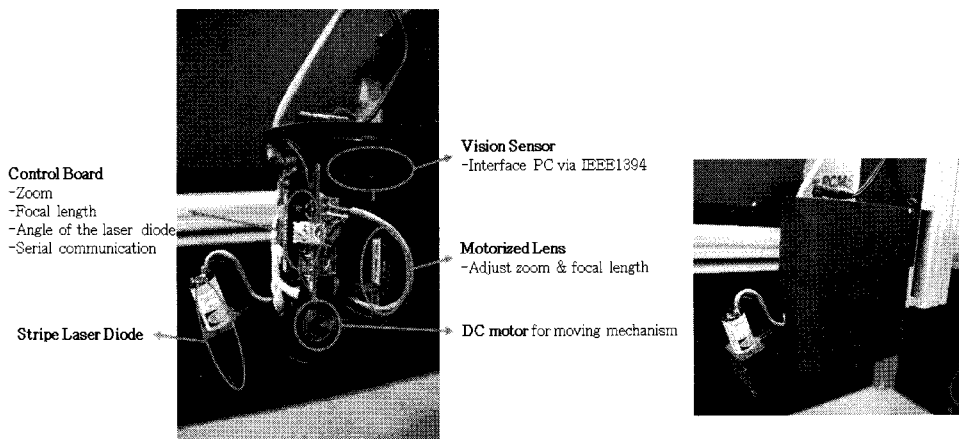


Fig. 2 Profile measurement sensor.

이며, $I(v)$ 는 v 에서의 밝기값이다.

반사가 있거나 부식면에 의한 산란이 일어나는 산업현장에서 사용될 때에는 여러 개의 레이저 띠가 생길 수 있어 이 중 최대값을 구별해서 사용하도록 한다. 우선 영상으로부터 밝기의 최대값을 찾게 되고, 이 주위에서 COG를 적용하여 원하는 형상의 표면이라 여겨지는 면을 찾게 된다. 추가적으로 영상전체에서 미세한 노이즈가 들어오기 때문에 단순히 COG를 적용하면 이런 값들이 평균이 취해짐으로써 결과값이 전체 영역의 가운데 부분으로 치우치게 된다. 따라서, 이런 영향을 없애기 위해 평균외란보다 큰 문턱값(Th_{high})을 넘는 경우에 대해서만 COG를 구하게 된다. 이를 통해 계산량이 줄어드는 부가적인 이득이 생기게 된다. 마지막으로 찾아진 좌표가 제대로 된 형상점인지 그 점에서의 밝기값이 다른 문턱값(Th_{low})을 넘는지 확인한다.

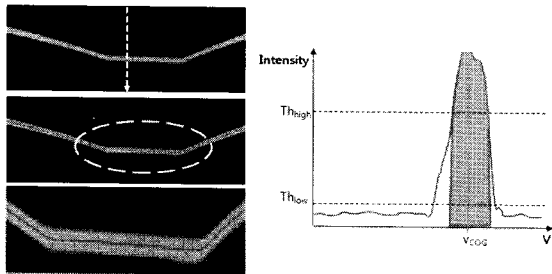


Fig. 3 Center of gravity (COG) with thresholding.

위의 과정을 Fig. 3에 나타내었다. 왼쪽 첫 번째 그림이 카메라로부터 들어오는 영상이고 아래가 결과이다. 표시부분을 확대하여 보면 마지막 그림과 같이 비교적 안정적으로 중심점이 구해지는 것을 알 수 있다. 오른쪽 그림은 수직방향으로 레이저 띠 부근의 밝기값 분포와 앞서 설명한 두 문턱값을 보여준다. 찾아진 중심점(v_{COG})가 레이저 띠 영역 안에 있어야 제대로 인식된 것으로 간주한다.

위의 무게중심법에서는 수직방향의 정보만 이용되었기 때문에 수평방향으로 보면 울퉁불퉁한 표면으로 보이게 된다. 용접구조물의 용접표면은 불연속적인 부분을 제외하고는 매끄러울 것이라 예상되므로 표면을 부드럽게 하는 과정을 거치도록 하였다. 이를 위해 평균 윈도우를 이용하였다. 수평방향의 해당 u 에서 그 점을 중심으로 N 개의 중심점들을 평균하여 형상의 중심점을 구한다. 이 방법에서 윈도우의 크기가 작으면 세부적인 특성

이 잘 나타나나 충분히 부드럽지 않은 표면을 얻게 되고, 윈도우의 크기가 크면 부드러운 표면을 얻는 대신 표면에 갑작스런 변화가 있는 경우 그곳의 위치를 정확히 찾기 힘들게 된다. Fig. 4에 윈도우의 크기를 3, 11, 21로 바꾸면서 실험한 결과를 나타내었다. 용접 응용에 있어서는 수평방향의 틈이나 용접선 위치를 찾는 것이 중요하기 때문에 세부적인 정보가 중요하여 $N = 3$ 으로 할 때 평균적으로 좋은 결과를 얻을 수 있었다. 최종적으로 구해진 중심점들은 좌표 변환을 통하여 실제 형상의 3차원 정보를 얻을 수 있다. 이를 위해 정교하게 제작된 보정블록이 사용되었다.

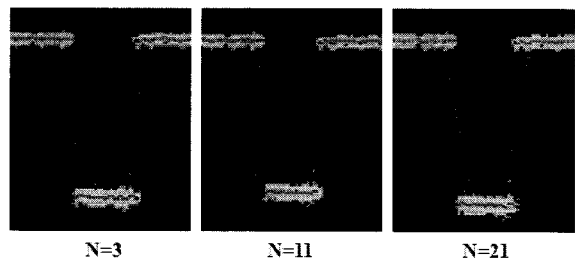


Fig. 4 Averaging results with different window sizes.

서론에서 기술하였듯이 일부 원격용접의 응용에서 용접선을 추적하는 것이 필요하다. 용접선 검출을 위한 기본적인 작업은 형상 정보의 깊이 차를 인식하는 것이다. 여기에 이미지 처리의 기본 작업인 모서리 검출방법을 활용할 수 있다. 많은 응용에서 Canny 모서리 검출기⁸가 믿음직한 결과를 주기 때문에 이 방법을 이용하였다. Canny 모서리 검출기에서는 외란이 있는 경우 가우시안 함수의 미분(difference of Gaussian, DOG)로 근사화된 마스크를 형상정보에 적용한 뒤 최대(최소)인 부분을 검출하여 상승(하강) 모서리를 검출한다.

3. 센서 기반 제어 방법

Fig. 5에 고려하고 있는 원격 용접 로봇 시스템의 구성을 보였다. 주 제어기로 PC가 이용되고 기존의 용접선 추적기를 개발된 센서로 대체하였다. 용접선 추적기를 이용하기 위해서 용접 진행방향으로 형상 측정 센서가 용접부와 일정간격 떨어진 채 먼저 진행하면서 용접선 정보를 얻게 된다. 로봇 이동시 이동 명령이 로봇 제어기에 전달되고 해당 위치로 추종하는데 수십 ms가 소모된다. 따라서, 이러한 지연을 고려한 제어 방법이 필요하다.

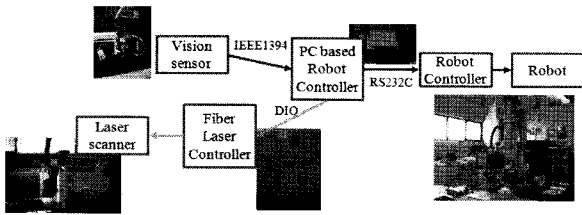


Fig. 5 Sensor guided remote laser welding robot system.

센서 기반 제어방법은 몇몇 연구자들에 의해 제안된 바 있다.^{9,10} 형상측정센서의 작동빈도, 선행간격, 동기화가 시스템의 추종 성능에 영향을 주게 된다. 여기에서도 특히 경로기반 제어와 유사한 예측 제어 방법을 사용하도록 하며 이를 Fig. 6에 나타내었다.

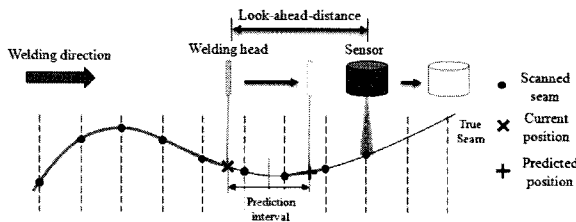


Fig. 6 Sensor guided control.

제어는 형상 측정 센서와 동기화되어 있고 제어 주기는 약 20 ms이다. 일정 간격으로 표시되어있는 지점에서 시각센서가 용접선을 검출하여 용접선 버퍼에 저장하고 그 순간에서의 속도를 읽은 다음 일정 시간의 평균속도를 구하게 된다. 진행방향으로의 예측위치 좌표를 추정 한 뒤 제어주기의 몇 배만큼 뒤를 예측할 것인지를 명령 후 추종시간을 고려하여 결정해 준다. 최종적으로 용접선의 정보를 이용해 예측위치에서의 용접선의 수평수직위치를 결정한다. 정확한 해당위치에서 획득한 정보가 없을 경우에는 그림에 나타나 있듯이 선형 보간법(Linear Interpolation)을 이용해 위치를 결정한다.

이상 간단한 예측 제어를 설명하였는데 이 외에 몇 가지 고려할 사항이 있다. 진행속도가 빠른 경우 수평수직 방향의 피크점이 인식이 안 되거나 되더라도 보간법으로 피크점으로 이동 명령을 줄 수 없는 경우가 있어 정확한 용접선 추적이 안 될 수가 있다. 또한 형상측정을 하는 지점에서의 정확한 로봇 위치를 얻을 수 있게 센서와 제어루프가 최대한 동기화가 되어야 한다. 용접선의 변화가 심한 경우에는 용접선이 영상에 잡힐 수 있게 로봇 속도 조절이 필요할 것이다.

경로기반 제어방법은 몇 가지 장점이 있는데 용접선 정보가 시간에 관계없이 저장되어 있어 믿을 수 없는 센서 값이 있는 경우 수정이나 삭제가 용이하며, 샘플링 시간이나 선행간격에 따른 성능변화를 줄일 수 있다.

4. 실험

제작된 센서의 성능 평가를 위해 직교좌표 로봇에서 실험을 행하였다. 작동거리를 100 mm에서 450 mm로 바꾸고 전진속도를 각각 10 mm/s와 50 mm/s로 바꾸면서 실험을 하였다. 정밀도 측정 시 해당 수평 방향의 위치에서 얻어진 깊이 정보와 실제 형상의 깊이 차이를 이용하였다. 정밀도는 평균 자승제곱근오차(Root Mean Square Error, RMSE)를 이용하였으며 Fig. 7에 나타내었다.

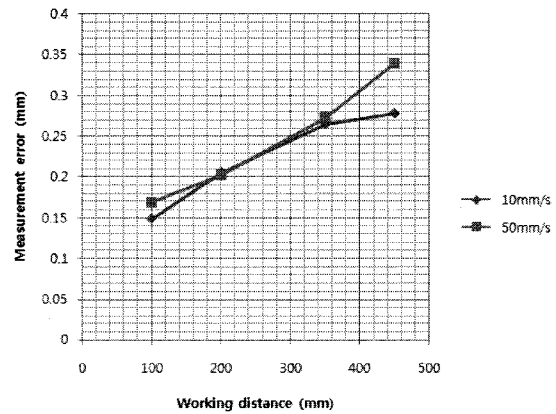


Fig. 7 Profile measurement error.

작동거리가 멀수록 정밀도가 떨어지는 것을 확인할 수 있었으며 100 mm에서 최고 0.1485 mm의 정밀도를 얻을 수 있었다. 전진속도가 빨라지는 경우 정밀도가 더 떨어지는 것을 확인할 수 있는데 주로 로봇의 진동과 영상 획득 중의 형상의 움직임 때문이다. 그러나 이전에 개발한 센서가 같은 상황에서 세 배이상 성능이 저하되는데 비해 그 영향이 크지 않음을 확인할 수 있었으며, 이는 고속 카메라의 셔터 스피드가 빠르기 때문에 영상획득 시 진동이나 움직임에 덜 영향을 받기 때문인 것으로 파악된다. 또한 고속카메라를 이용함으로써 형상 측정 속도는 66 fps까지 향상됨을 확인할 수 있었다.

다음으로 S자 형태의 맞대기 용접선 추종 실험을

수행하였다. 맞대기 용접의 경우 이론적으로 이음매가 완벽할 경우에는 검출이 불가능하지만, 정렬시 단차가 조금 생기거나 가공시 변형으로 인해 이음매가 완벽히 일치하는 경우가 드물다. 실제 영상을 찍어보면 단차가 거의 없는 경우에도 용접선 이음매 부분의 두께가 가늘게 나타 때문에 단순히 모서리 검출과 두께 정보를 조합함으로써 맞대기 용접선을 검출할 수 있었다. 실험에서 센서가 40 mm의 선행간격을 가지고 로봇에 장착되었기 때문에 앞 절에서 설명한 경로기반 제어방법을 이용하였다. 전진속도를 각각 20 mm/s와 40 mm/s로 바꾸면서 실험한 용접선 추종 결과와 그 오차를 Fig. 8에 나타내었다. 앞의 실험과 유사하게 전진속도에 따라 그 오차의 편차가 그리 크지 않았으며, 두 경우 모두 추종오차가 0.2 mm 범위 안에 들어오는 것을 확인할 수 있었다.

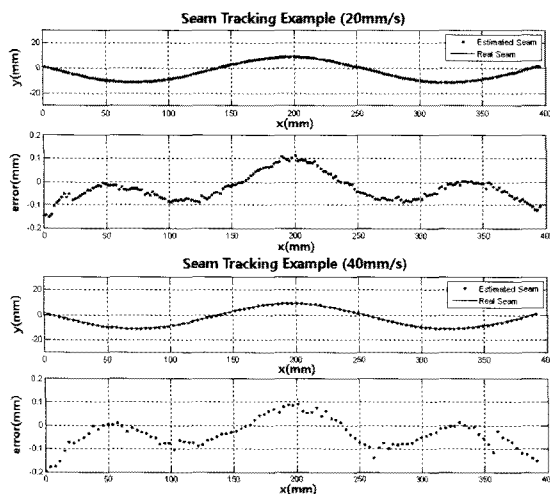


Fig. 8 S-shaped seam tracking results.

Table 1 Specification of the developed profile measurement sensor

Specification	Description
Laser power	<5 mW
Beam width	>0.2 mm
CCD	640 x 480 pixel, 200 fps
Working distance	100-450 mm
Lateral resolution	0.033-0.054 mm/pixel
Field of view	16-26 mm/480pixel
Depth resolution	0.048-0.141 mm/pixel
Depth of view	31-90 mm/640pixel
Frame rate	66 fps (Athlon 64 3000+/1GB/WindowXP)

마지막으로 Table 1에 개발된 형상 측정 센서의 사양을 나타내었다.

5. 결론

선형태의 레이저와 카메라를 이용하여 원격 레이저 용접 로봇을 위한 형상측정 센서를 개발하였으며, 가변구조를 가지도록 하여 100 mm에서 450 mm까지의 다양한 작동거리에서 최고 66 fps로 작동할 수 있다. 비교적 간단한 구조의 센서 기반 제어 방법을 통해 개발된 센서를 로봇에 제어에 적용할 수 있다. 추후에는 칼만필터 등의 방법을 통해 잘못된 센서 값을 보정하여 보다 안정적인 센서의 적용이 가능토록 할 예정이다.

후 기

본 논문은 지식경제부 성장동력산업에서 지원하여 연구하였습니다.

참고문헌

- 1) Beyer E., Klotzbach A., Fleischer V., and Morgenthal L., "Nd:YAG - Remote Welding with Robots", 2rd Int. WLT-Conf. on Lasers in Manufacturing 2003, pp. 367-374, 2003.
- 2) Klotzbach A., Fleischer V., Morgenthal L., and Beyer E., "Sensor guided remote welding system for YAG-laser applications", 3rd Int. WLT-Conf. on Lasers in Manufacturing 2005, pp. 17-19, 2005.
- 3) Haug K. and Pritschow G., "Robust Laser-stripe Sensor for Automated Weld-seam-tracking in the Shipbuilding Industry", 24th Annual Conf. of IEEE Industrial Electronics Society, pp. 1236-1241, 1998.
- 4) Liu CJ, Li YB, Zhu JG, and Ye SH, "Study on sensor design technique for real-time robotic welding tracking system", J. of Physics: Conference Series, Vol. 48, No. 1, pp. 811-816, 2006.

- 5) Zou Y., Zhao M., Zhang L., and Jiang C., "Development of laser stripe sensor for automatic seam tracking in robotic tailored blank welding", 7th World Congress Intelligent Control and Automation, pp. 3062-3066, 2008.
- 6) Iakovou D., Aarts R., and Meijer, J., "Sensor integration for robotic laser welding processes", Int. Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics, pp. 886-894, 2005.
- 7) Xu P., Tang X., and Yao S., "Application of circular laser vision sensor (CLVS) on welded seam tracking", J. of Materials Processing Technology, Vol. 205, No. 1-3, pp. 404-410, 2008.
- 8) Canny J., "A computational approach to edge detection", IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 8, No. 6, pp. 679-698, 1986.
- 9) Graaf M.W., Aarts R.G.K.M., Meijer J., and Jonker J.B., "Robot-sensor synchronization for real-time seam-tracking in robotic laser welding", 3rd Int. WLT-Conf. on Lasers in Manufacturing 2005, pp. 419-424, 2005.
- 10) Zhou L., Lin T., and Chen S.B., "Autonomous acquisition of seam coordinates for arc welding robot based on visual servoing", Journal of Intelligent and Robotic Systems, Vol. 47, No. 3, pp. 239-255, 2006.