

파형부재의 플라즈마 아크용접을 위한 자동 용접선 추적

양주웅[†] · 박영준^{*}

Automatic Seam Tracking for Plasma Arc Welding of a Corrugation Panel

Joo-Woong Yang and Young-Jun Park

Key Words : Automatic Seam Tracking(자동 용접선 추적), Laser Vision Sensor(레이저 비전 센서), Corrugation Panel(파형부재), Plasma Arc Welding(플라즈마 아크용접)

Abstract

This paper describes an automatic weld seam tracking method of plasma arc welding system designed for the corrugation panel that consists of a linear section and a curved section with various curvatures. Due to the complexity of the panel shape, it is difficult to find a seam and operate a torch manually in the welding process. So, the laser vision sensor for seam tracking is designed for sensing the seam position and controlling a torch automatically. To achieve precise seam tracking, the design of sensor head, image simulation, and calibration are carried out. Through a series of experiment result, compensation algorithm is added and real time error compensation is achieved. The experiment result shows that this vision sensor works effectively. It will provide more precise welding performance and convenience to the operator.

1. 서 론

선박건조에 필수적인 금속접합에 있어 가장 많이 사용되는 공정중의 하나인 아크용접은 고도의 숙련된 기술을 지닌 작업자를 필요로 하는 공정으로서, 고열과 아크빛(arc light), 스파터(spatter), 매연(fume), 소음 등으로 인해 작업 환경이 열악하고 힘들어 자동화가 절실하게 요구되는 분야 중의 하나이다. 용접공정에는 용접구조물의 치수 오차와 용접시의 국부적인 입열로 인해 용접물의 열변형이 존재하고 아크의 입열량과 용접부의 형상 및 용접부에 대한 토치(torch)의 각도 등의 용접변수에 따라 용접 품질이 결정된다. 따라서 고도의 용접자동화를 위해서는 용접을 해야 할 부분을 자동으로 추적하고 용접변수를 자동으로 조절할 수 있도록 용접선의 위치와 용접부 형상을 측정할 수 있는 센서의 개발이 필요하다[1,2].

자동용접에 사용되는 용접선 추적 센서는 크게 접촉식과 비접촉식 센서로 나뉘어 진다. 이 중 접촉식 센서는 간단하고 신뢰도가 높으나 용접부의 형상에 대한 정보를 얻기 어렵고 측정하고자 하는 대상과의 접촉을 통해 측정이 이루어지므로 적용에 있어서 제한점이 많다[3]. 아크용접에 적용되어지는 비접촉식 센서는 아크 센서(arc sensor)와 시각센서(vision sensor)가 있는데, 아크 센서는 용접시 토치 팁에서 용접부까지의 거리의 변화와 아크의 전압, 전류의 변화 사이의 관계를 사용하는 센서로, 구조가 간단하고 경제적으로 유리한 장점을 가지고 있다. 그러나 측정 방법상 토치의 위빙(weaving)이 반드시 필요하고 분해능이 떨어지며, 미리 잘 정의된 용접부의 형상을 필요로 하므로 용접부의 형상 정보를 얻어 낼 수 없는 단점을 가지고 있다[4]. 시각센서는 레이저 광이나 초음파를 측정부에 조사한 뒤 반사되어서 센서로 돌아오기까지의 비행 시간(time of flight)을 측정해서 위치 정보를 얻어내는 방식과 레이저를 보조광으로 사용하고 광삼각법(optical triangulation)의 원리를 이용하는 방식으로 나눌 수가 있는데, 전자의 경우 광삼각법의 원리를 이용하는 시각센서에서 필연적

[†] 삼성중공업 조선플랜트연구소 메카트로연구파트
E-mail : joowoong.yang@samsung.com
TEL : (042)865-4686 FAX : (042)865-4688

^{*} 삼성중공업 조선플랜트연구소 메카트로연구파트

으로 발생하는 그림자효과(shadow effect)에 의한 정보의 유실이 없고 측정물의 위치에 따른 분해능의 차이가 없으나 초당 얻을 수 있는 위치 정보의 양이 적은 단점이 있다[5]. 광삼각법의 원리를 이용하는 방식의 시각센서는 앞에서 열거한 다른 센서에 비해 주변 노이즈의 영향을 많이 받고 측정 신호에서 정보를 추출해내는 과정이 상대적으로 복잡하지만, 측정이 용접공정과는 무관하게 이루어지고 용접선의 위치 정보뿐만 아니라 용접부의 형상 정보도 얻어낼 수가 있어서 용접선 추적과 용접공정 모니터링 및 용접변수 제어가 가능하다, 따라서 자동용접을 위한 센서로 가장 많이 연구되어지고 있으며 적용도 활발히 이루어지고 있다[6].

본 논문에서는 광삼각법의 원리를 이용한 시각센서를 사용하여 파형부재의 용접선 추적을 하고자 한다. 파형부재라는 특수한 용접부재의 형상에 대해 용접선 추적이 가능한 시각센서의 광학설계 및 설계의 타당성을 검증하기 위한 시뮬레이션, 시각 센서의 보정 작업을 수행하고 오차보상 실험을 통해 그 유효함을 보이고자 한다.

2. 시각센서

2.1 시각센서의 측정 원리

본 연구에서 사용하는 시각 센서의 측정 원리는 삼각측량법에 의한 거리 측정법으로서 구조화된 레이저 띠가 임의의 물체에 투영될 때 Fig. 1 과 같이 A, B 및 C 물체의 3 차원 위치에 따라 2 차원의 영상으로 반사된 레이저 띠의 위치변화를 관측하여, 2 차원 영상좌표로부터 카메라 교정을 수행하여 카메라에 대한 물체의 위치정보를 획득하는 것이다[7].

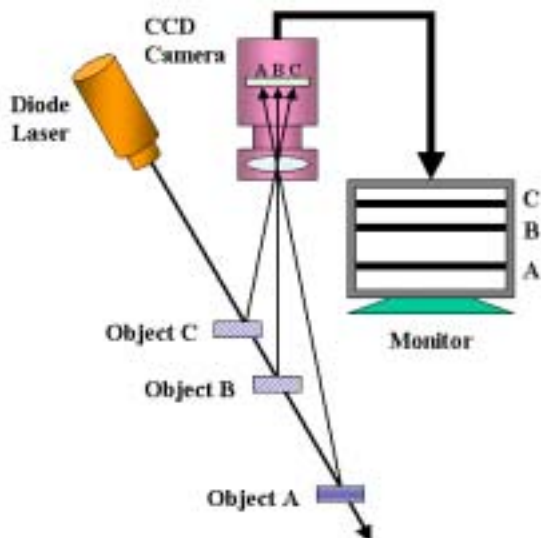


Fig. 1 Principle of the Visual Sensing

2.2 시각센서 설계

용접선 추적을 하고자 대상은 두께가 1.2 mm이고 직선구간과 서로 다른 곡률을 가진 6 개의 곡선 구간의 조합으로 이루어진 파형부재로서 Fig. 2 와 Fig. 3 은 각각 파형부재의 사진과 치수를 나타내고 있다. 본 시스템에서 시각센서는 용접 토치와 일체형으로 설계되었다. 용접 토치는 이론적으로 용접시 곡선부의 접선에 수직인 방향으로 회전하면서 이동하기 때문에 일체형으로 설치된 시각센서 역시 동일한 운동을 하게 된다. 하지만 아크광의 영향으로 Fig. 4 와 같이 일정거리 'd' 만큼 앞선 위치에 레이저 띠가 조사되어 용접선을 추적하게 되므로 곡선부에서는 곡률에 따라 레이저 띠가 반사되는 위치가 다르기 다르게 된다. 따라서 각 구간의 곡률을 고려하여 반사된 레이저 띠가 카메라의 시야에서 벗어나지 않도록 설계해야 하고 카메라와 레이저가 일정각 이상을 이루도록 배치하여 영상에 나타나는 레이저 띠가 2 개로 분리되어 특징점 및 용접선의 추적이 용이하도록 설계해야 한다. 파형부재의 용접선 추적을 위해 설계에 반영되어야 하는 것들이 Fig. 4 에 나타나 있다. 카메라의 광축과 레이저의 광축이 이루는 각 θ 에 따라 레이저 띠의 영상은 다르게 보이는데 Fig. 5 는 θ 에 따라 나타나게 될 레이저 띠의 영상을 시뮬레이션 한 것의 일부를 나타낸 것이다. 일반적으로 θ 가 커지면 분해능이 약간씩 높아지면서 측정범위가 줄어들고, 측정범위 내에서 깊이 방향으로의 분해능의 차이가 점점 줄어든다.



Fig. 2 Photo of Corrugation Panel

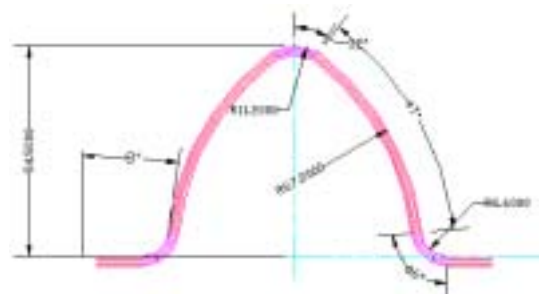


Fig. 3 Dimension of Corrugation Panel

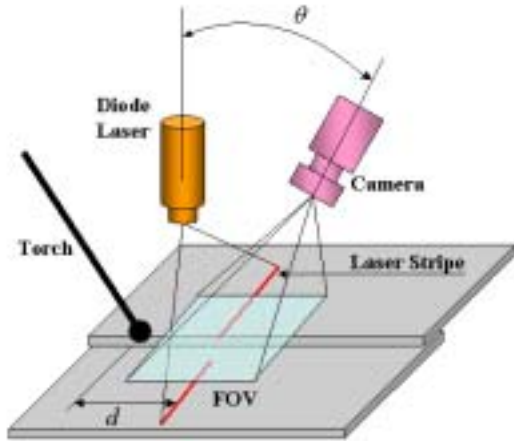


Fig. 4 Design Parameters of Vision Sensor Head

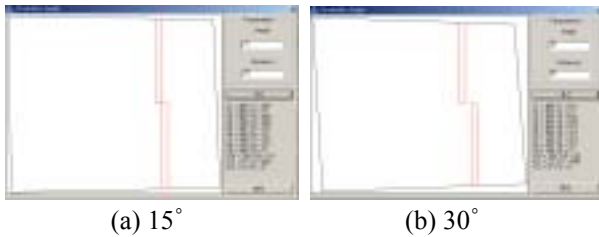


Fig. 5 Simulated Laser Stripe Image According to θ

반면에 측정물이 복잡할 경우 카메라의 시야를 가리는 사각이 증가하고 그림자 효과로 인한 정보의 손실이 생기게 된다[7]. Fig. 5 에서 볼 수 있듯이 θ 가 최소한 15° 이상이 되어야 두 개의 띠로 구분 가능하며 30° 이상이 되면 완전히 분리된 영상을 얻을 수 있음을 알 수 있다. Fig. 4 에서 토치에서 레이저 띠 까지의 거리 ‘d’도 중요한 설계 변수인데, 이 값이 너무 크면 파형부채의 일부 구간에서 레이저 띠가 영상에서 사라지는 현상이 발생하며 너무 작으면 아크광의 영향으로 노이즈가 많이 들어 올 수 있기 때문이다. Fig. 6 은 결정된 d와 θ 에 따라 배치를 했을 때 각 구간에서 정상적으로 용접선 추적이 가능한지를 시뮬레이션을 통해 확인한 것이다.

2.3 시각센서의 구성

본 연구에서 사용한 센서헤드는 CCD 카메라, 수동초점 렌즈, 대역통과 필터(Narrow Band Pass Filter), 다이오드 레이저로 구성되어 있다. CCD 카메라는 640×480 픽셀로 구성되어 있고, 다이오드 레이저는 출력이 25 mW 이고 650 nm의 파장을 가지고 있으며 내부의 원통형 렌즈를 통해 직선광으로 변화된다. 아크광의 파장 영역이 가시광선의 전 영역대에 걸쳐 분포하고 있지만 그 영향을 줄이기 위해 레이저 광원의 파장대 만을 선택적으로 통과시킬 수 있는 대역통과 필터를 사용하였다.

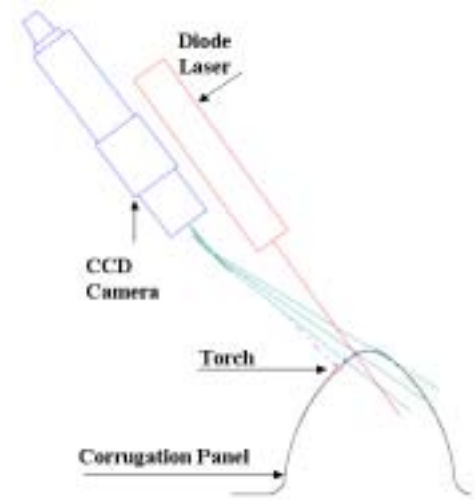


Fig. 6 Simulation of Vision Sensor Design

수동초점 렌즈는 초점거리가 25 mm로서 시야는 12.8 mm×9.6 mm가 되도록 배치하였다. 따라서 본 시각센서의 최대 분해능은 0.02 mm이 된다. 카메라와 레이저가 이루는 분리각 θ 는 30°로 선정하였으며 레이저 띠의 위치는 용접위치로부터 6 mm가 되도록 설계하였다. Fig. 7 은 위에서 선정된 값을 기준으로 구성된 비전 센서 헤드의 설계결과를 나타내고 있다.

3. 시각센서 교정(Vision Sensor Calibration)

3.1 교정(Calibration)

시각센서로 용접부를 측정하여 얻어진 영상에서 용접선의 위치나 갭 크기 인식등을 위해서는 영상면에서의 좌표를 실제 공간 좌표계의 좌표로 변환이 필요하다. 교정은 이렇게 영상면에서의 좌표와

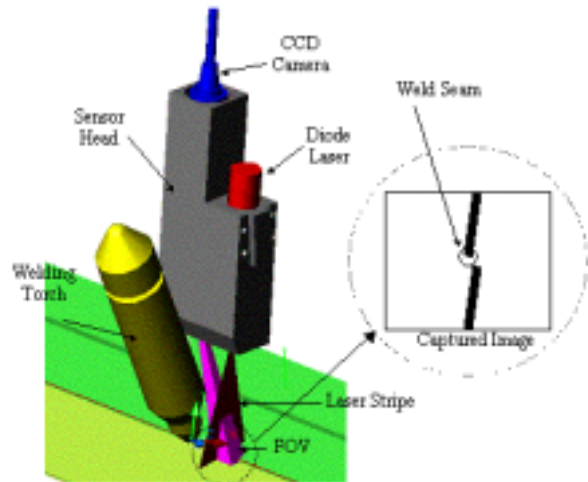


Fig. 7 Resulted Design of Vision Sensor Head

공간상에서의 좌표 사이의 관계를 설정 해 주는 것으로 시각센서와 보조 광원을 동시에 사용하면 1대의 카메라만으로도 3차원 측정이 및 거리판정이 가능하다는 사실을 이용하여 용접선 추적에 필요한 3차원 절대 좌표값을 구할 수 있다.

먼저 좌표계를 정의하면 F_R 은 용접 로봇의 좌표계로서 원점은 로봇의 중심에 위치하며, F_U 는 카메라의 영상상에서 정의되는 영상 좌표계, F_S 는 로봇에 장착된 센서 헤드의 센서 좌표계를 나타낸다. Fig. 8은 이러한 3가지의 좌표계를 나타내고 있으며, 그림에서 O 는 투영 중심을 의미한다. 카메라로부터 얻은 레이저 반사광의 영상 정보로부터 용접선 위치에 대한 공간상의 3D 좌표계를 구하기 위해서는, 교정된 카메라 모델을 이용하여야 한다[7]. 카메라 모델은 2차원 영상 좌표계를 3차원의 센서 좌표계로 변환시키는 4×3 행렬의 형태로 나타낼 수 있다. 이 때, 영상좌표계와 센서좌표계는 모두 동차 좌표계의 형태로 표현된다. 센서 좌표계 F_S 에서 임의의 한 점 P 를 동차 좌표로 나타낸면 $(\bar{w}_x, \bar{w}_y, \bar{w}_z, \bar{w})$ 가 된다. 이 점에 대응되는 영상 평면상의 한 점 P 를 영상좌표계 F_U 에서 동차 좌표로 $(u, v, 1)$ 과 같이 나타낼 수 있다. 이 때, P 와 U 의 대응관계를 나타내는 변환행렬 T_S^U 는 식 (1)이나 식 (2)와 같이 정의할 수 있다.

$$P_S = T_S^U \cdot U \tag{1}$$

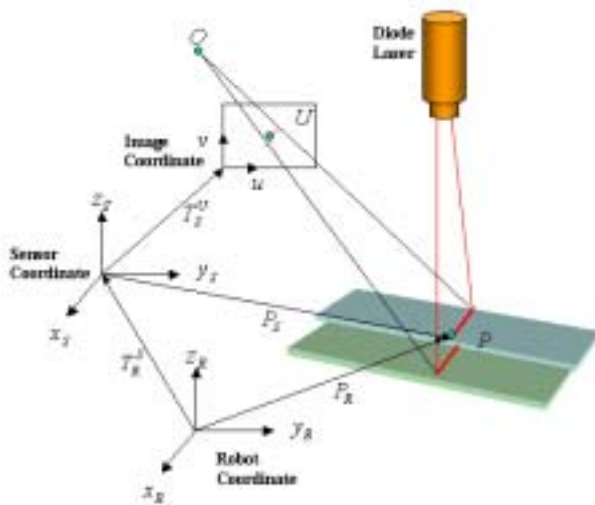


Fig. 8 Coordinates of the Vision Sensor Calibration[7]

$$\bar{w} \begin{bmatrix} x_S \\ y_S \\ z_S \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} & t_{13} \\ t_{21} & t_{22} & t_{23} \\ t_{31} & t_{32} & t_{33} \\ t_{41} & t_{42} & t_{43} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \end{bmatrix} \cdot U \tag{2}$$

여기서 식 (2)의 변수 \bar{w} 는 임의로 설정할 수 있으므로 t_{43} 를 1로 설정할 수 있다. 따라서 식 (2)는 식(3)과 같은 행렬식으로 나타낼 수 있다 [8].

$$\begin{bmatrix} u^1 & v^1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -u^1 x_S^1 & -v^1 x_S^1 \\ 0 & 0 & 0 & u^1 & v^1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -u^1 y_S^1 & -v^1 y_S^1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & u^1 & v^1 & 1 & 0 & -u^1 z_S^1 & -v^1 z_S^1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ u^n & v^n & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -u^n x_S^n & -v^n x_S^n \\ 0 & 0 & 0 & u^n & v^n & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -u^n y_S^n & -v^n y_S^n \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & u^n & v^n & 1 & 0 & -u^n z_S^n & -v^n z_S^n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_{11} \\ t_{12} \\ t_{13} \\ t_{21} \\ t_{22} \\ t_{23} \\ t_{31} \\ t_{32} \\ t_{33} \\ t_{41} \\ t_{42} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_S^1 \\ y_S^1 \\ z_S^1 \\ \vdots \\ x_S^n \\ y_S^n \\ z_S^n \end{bmatrix} \tag{3}$$

여기서 (x_S^j, y_S^j, z_S^j) 와 (u^j, v^j) 는 각각 j 번째 교정점의 센서 좌표와 이에 대응되는 영상 좌표값이다. 이 식에서 미지수는 11개 이므로 서로 같은 평면상에 존재하지 않는 4점 이상의 교정 데이터가 있으면 최소자승법으로 변환행렬을 구할 수 있다.

3.2 교정 시험(Calibration Test)

식 (3)을 이용하여 변환행렬을 구한 후 그 타당성을 검증하기 위하여 Fig. 9에 나타난 것과 같이 y, z 좌표를 각각 0.5 mm 간격으로 달리하여 측정 한 후 오차를 분석하였다.

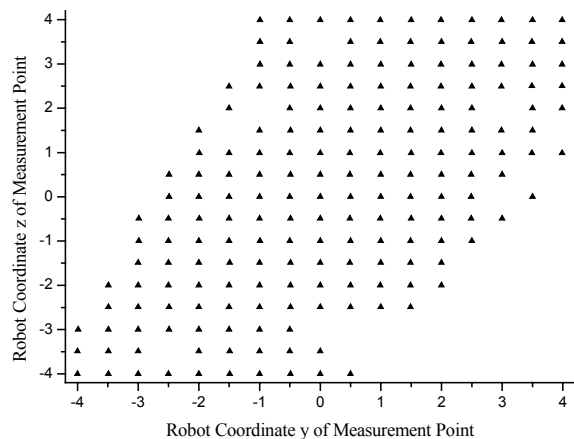


Fig. 9 Robot Coordinates of Test Points

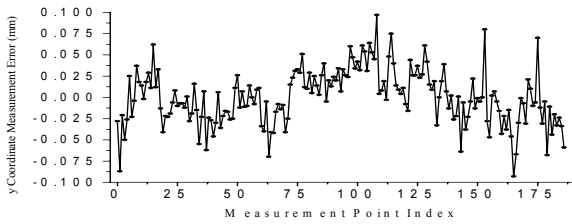


Fig. 10 Measurement Errors of y Coordinate

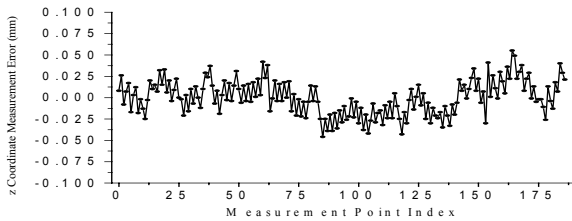


Fig. 11 Measurement Errors of z Coordinate

측정방법은 동일 측정점에 대해서 로봇을 Fig. 9에 나타난 좌표 만큼 이동시킨 후 좌표를 측정하여 이동한 좌표값과 측정된 좌표값의 차이를 오차로 도출하였다. Fig. 10과 Fig. 11에서 알 수 있듯이 각 좌표의 측정 오차의 절대값이 0.1 mm를 넘지 않음을 알 수 있다.

4. 용접선 추적 실험

4.1 용접 시스템

본 연구에서 설계된 시각센서가 장착된 용접 시스템은 Fig. 12과 같다. 용접장치에 부착된 시각센서에서 구조광이 포함된 용접선의 영상을 획득하여 시각센서의 영상 처리를 담당하는 영상처리 제어기로 영상을 전송하면, 영상처리 제어기에서는 노이즈를 제거하고 영상을 분석하여 원하는 용접선 정보를 얻게 된다. 여기에서 처리하는 정보는

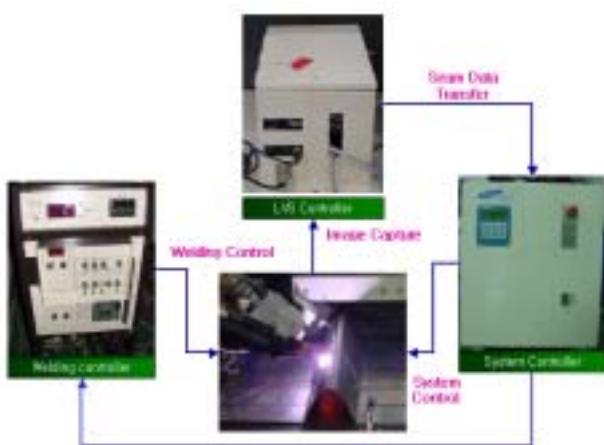


Fig. 12 Welding System Configuration

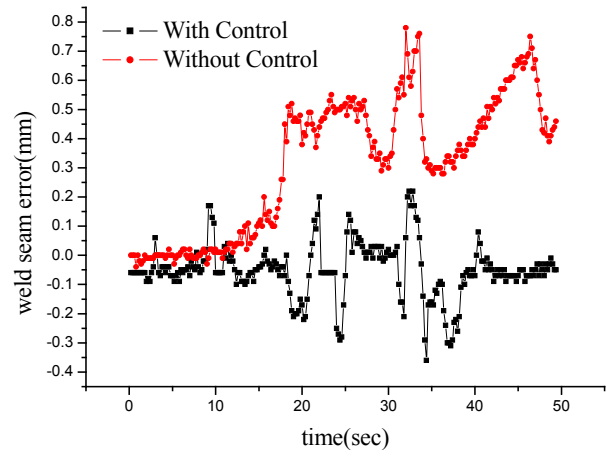


Fig. 13 Seam Tracking Test Result

주로 용접선의 위치에 대한 정보의 산출이 이루어진다. 이렇게 측정된 용접선 정보는 시스템 제어기로 전달되게 되는데 이 때 각각의 제어기들은 시리얼 통신을 통해 서로 필요한 정보를 통신을 통해 주고 받게 된다. 시스템 제어기에서는 시각센서에서 측정된 용접선 위치 오차를 보상하며 용접을 진행하게 된다.

4.2 오차보상 실험

시각 센서의 용접선 추적 성능을 알아보기 위하여 2 단계로 실험을 진행하였다. 먼저 시각센서에서 용접선의 좌표를 측정하되 제어입력으로는 사용하지 않고 진행하였다. 용접 토치와 시각 센서는 일체형으로 설계된 홀더에 하나로 고정되어 있으므로 시각 센서에서 측정된 좌표값은 토치가 용접선에서 벗어난 정도를 의미하게 된다. 다음으로 같은 용접 부재에 대해서 시각 센서의 측정값을 피드백 받아 용접선 추적을 하면서 실험을 진행하였다. Fig. 13은 실험 결과를 나타내는데, 제어를 하지 않고 단순히 측정만을 한 경우는 점차 오차가 증가함을 알 수 있다. 이는 부재의 용접선이 기계의 진행방향에 대해 비스듬히 놓여 있음을



Fig. 14 Welding Experiment

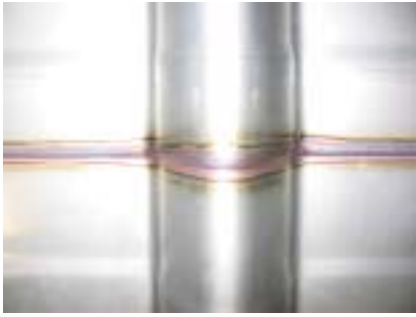


Fig. 15 Work-Piece After Welding

의미한다. 또한 곡률에 따라 용접선의 변형이 다르게 발생하여 오차의 변화량에 나타났음을 확인할 수 있다. 측정값의 입력을 받아서 피드백 제어를 한 경우 용접선의 측정 오차가 일정 편차를 갖으며 수렴해 가고 있음을 알 수 있다. 오차가 증가하는 부분은 곡률이 상대적으로 큰 부분으로 직선 구간이나 곡률이 작은 부분에 비해 용접선의 변형이 심하게 나타난 구간이다. Fig. 14 와 Fig. 15 는 각각 용접선 추적을 하면서 용접 실험을 하는 사진과 용접 후 용접 비드(bead) 사진을 나타내고 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 파형부재의 용접선 추적을 수행하기 위하여 광삼각법의 원리를 이용한 시각센서를 개발 하였다. 기존에 수행되었던 직선부의 용접선 이나 곡선이라 하더라도 균일한 곡률을 가진 부재에 대한 용접선 추적과 다르게, 본 연구에서 대상으로 삼은 부재와 같이 0.2 mm의 이내의 추적 정밀도를 갖으면서 다양한 곡면에 대한 용접선 추적이 가능한 센서를 개발하기 위하여 분해능 0.02 mm을 만족시키는 시각 센서의 설계 및 시뮬레이션, 시각 센서의 보정 및 검증, 200 msec 이내의 영상 처리 알고리즘 설계를 수행하였다. 이를 바탕으로 실제 파형을 가진 용접 부재에 대하여 용접선 추적 성능을 실험하여 신뢰성 있는 용접선 추적이 됨을 확인하였다. 향후 파형 부재의 용접에 본 시스템을 적용한다면 빠른 용접 속도에 대해서도 자동으로 용접선 추적이 가능해져 생산성 및 안정된 용접 작업이 가능할 것으로 판단된다.

참고문헌

(1) J.E.Agapakis, J.M.Katz, M.Koifman, G.N.Epstein, D.O.Eyring And H.J.Rutishauser, 1986, "Joint Tracking and Adaptive Robotic Welding Using Vision Sensing of the Weld Joint Geometry", Welding Journal, Vol.65, No.11, pp.33-41.

(2) R.W.Richardson, 1986, "Robotic Weld Joint Tracking Systems – Theory and Implementation Methods", Welding Journal, Vol.65, No.11, pp.43-51.
 (3) N.Nayak and A.Ray, 1993, Intelligent Seam Tracking for Robotic Welding, Springer-Verlag New York.
 (4) Z.Smati, D.Yapp and C.J.Smith, 1987, "Laser Guidance System for Robots", Robotic Welding, IFS Ltd, UK, pp.91-103.
 (5) H.Clergeot, D.Placko and S.Guilon, June 1986, "Laser Range Finding Sensor for Robotics", Proc. Of the 6th International Conference on Robot Vision and Sensory Controls, pp.235-234.
 (6) D.Nitzan, May 1988, "Three-Dimensional Vision Structure for Robot Applications", IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell., Vol.10, No.3, May 1988, pp.291, 309.
 (7) Y. T. Sohn, 1995, "Visual Recognition and Tracking of Weld Joints for Robotic Arc Welding", M.S. thesis, KAIST.
 (8) D.H.Ballard, and C.M.Brown, 1985, "Computer Vision", Prentice Hall.