



높이 변화가 있는 맞대기 용접선 추적용 시각센서

김 무 연* · 김 재 웅**

*영남대학교 대학원 기계공학과

**영남대학교 기계공학부

Vision Sensor System for Weld Seam Tracking of I-Butt Joint with Height Variation

Moo-Yeon Kim* and Jae-Woong Kim**

*Graduate School of Mechanical Engineering, Yeungnam University, Kyongbuk 712-749, Korea

**School of Mechanical Engineering, Yeungnam University, Kyongsan Kyongbuk 712-749, Korea

Abstract

In this study, a visual sensor system which can detect I-butt weld joint with height variation and includes a seam tracking algorithm was investigated. Three-dimensional position of an object can be acquired by using the method of distance measurement, i.e., an optical trigonometry which results from the spatial relations between the camera, the object and the structured light by a visible laser. Effects of laser intensity and iris number for the image quality as well as object material were investigated for the optical system design. For the image processing, a region of interest is defined from the whole image and a line image of laser is drew by using the gray level difference in the image. From the drew laser line, the weld joint can be recognized in searching the biggest point position calculated from the central difference method. Through a series of welding experiments, a good tracking performance was confirmed under GMA welding.

* Corresponding author : jeakim@yu.ac.kr

(Received July 20 2004)

Key Words : Visual sensor, Height variation, Seam tracking, Image processing, Central difference method

1. 서 론

용접공정은 인체에 유해한 연기 및 광선의 발생 등으로 인해서 조악한 작업환경을 만들기 때문에 공장자동화에 있어서 일차적인 순위의 작업으로 여겨지고 있다. 따라서 용접공정에는 여러가지 기계장치를 적용하여 자동화가 많이 이루어지고 있으나, 공작물 자체의 오차와 장착 오차, 용접부 형상의 오차 등으로 인해서 시스템 운전에서 위치보정작업이 필요하게 되어 자동화의 목적을 달성하기가 매우 어렵다. 그래서 기존의 기계화 용접장치나 로봇에 부착하여 용접선의 추적 및 공정변수의 제어를 위한 센서 개발의 필요성이 부각되었으며¹⁾, 미국, 유럽 등 선진국과 국내에서는 이들 센서를 이용하여 용접작업성과 제품의 품질을 향상시키는 노력을

경주하고 있다. 센서를 이용함으로써 공작물간의 정밀도 관리를 완화시킬 수 있게 되며 자동용접 시스템의 교시(teaching)시간 및 재교시 회수의 단축은 물론 적응제어의 적용에 의한 용접대상물의 확대와 생산성 향상을 유도할 수 있다. 이렇듯 용접자동화용 센서의 적용기술은 용접자동화에 있어서 큰 비중을 차지하고 있기 때문에 여러가지 센서의 개발 및 적용에 관한 연구가 활발하게 이루어지고 있다²⁻⁹⁾.

근래 주로 연구개발의 대상이 되고 있는 용접선 자동 추적용 센서는 비전센서인데, 비전센서는 용접조건에 영향을 받지 않고 개선(groove)형상, 용접선 중심위치, 용융지의 크기 등 다양한 정보를 이용할 수 있다는 특징이 있기 때문이다. 그러나 아크용접 시 발생하는 강렬한 아크 빛과 스펙터에 의해 영향을 받으며, 화상처리를 위해 많은 시간이 소요된다는 단점이 있다. 또한

I형 맞대기 이음에서 틈새가 좁으면 용접선을 찾기 힘들다는 단점이 있다^{4,7-8)}. 그럼에도 불구하고 레이저 점광원을 용접선의 횡방향으로 주사함으로써 구조광을 만들어 I형 맞대기 이음부에서의 밝기강도 차를 이용하여 용접선을 추적할 수 있음을 보였다⁹⁾.

본 연구에서는 띠 모양의 구조화된 빛을 이용한 비전 센서에서, 용접물 재료에 따른 화상품질에의 영향인자를 분석하고, 구조화된 빛의 화상으로부터 그레이 레벨의 중심차분값을 이용하여 맞대기 용접 이음부를 추출함으로써 높이 변화가 있는 I형 맞대기 용접선을 추적하기 위한 시스템을 구성하여 성능을 조사하였다.

2. 시각센서의 원리

2.1 측정원리

본 연구에서는 광학삼각법에 의한 거리 측정법을 이용한다. 광학 삼각법으로 슬릿빔 형태의 구조화된 빛을 모재 표면에 경사지게 조사하여 Fig. 1과 같이 모재의 A, B, C와 같은 3차원의 위치에 따라 반사된 레이저 띠를 CCD 카메라로 받아들여 2차원의 영상에서의 위치변화를 관찰하여, 2차원 영상좌표로부터 카메라 보정을 수행하여서 카메라에 대해서 물체의 3차원 위치 정보를 획득하게 된다.

2.2 센서헤드의 구성

시각센서 헤드는 크게 다이오드 레이저, CCD 카메라, 대역통과필터(band pass filter)로 구성하였다. 점광원으로부터 구조화된 광을 만들어내기 위하여 원통형 렌즈가 내장된 파장 668nm, 출력 2mW의 적색 가시광인 다이오드 레이저를 광원으로 사용하였는데, 원통형 렌즈는 초점거리의 조절이 가능한 구조이다. 여기서 사용한 대역통과필터는 중심파장이 670nm이고 반치폭이 $\pm 5\text{nm}$ 이다.

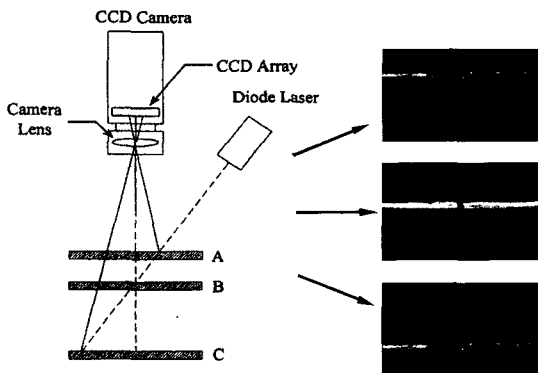


Fig. 1 Principle of 3-dimensional visual sensing

Fig. 2는 시각센서의 개략도이다. 레이저 다이오드는 일반적으로 카메라 렌즈의 중심축과 20~40°의 각도로 모재에 투사되는데 깊이 방향의 감지 능력과 센서의 크기를 고려하여 투사각(a)을 25°로 하였으나 그 각도는 조절 가능하다. 모재에서 카메라 렌즈까지의 거리는 148mm로 설정하였으나 필요에 따라 조절 가능하도록 설계하였으며 다이오드 레이저와 카메라 렌즈의 중심축까지의 거리는 72mm, 선행거리(look ahead distance), 즉, 레이저 띠와 토치의 거리는 모재에서 카메라 렌즈까지의 거리가 148mm일 때 약 45mm내외이다.

2.3 모재의 높이변화와 화상정보

구조화된 빛을 이용한 비전센서에서는 2차원 화상로부터 용접선의 3차원 위치정보를 산출할 수 있다. Fig. 3은 카메라와 레이저, 모재 사이의 기하학적 관계를 나타내고 있다. 카메라 렌즈와 모재와의 거리(Z_c)가 달라지게 되면 가시영역(field of view)도 분명히 달라지게 되므로 높이의 변화에 따른 픽셀 당 분해능의 관계를 알 필요가 있다. 선행 연구에서 구한 관계식을 이용하여 높이변화에 따른 픽셀 당 분해능을 구하면 Fig. 4와 같이 나타낼 수 있다.⁷⁾ Fig.4에서 보는 것과 같이 Z 값이 커질수록 가시영역(field of view)이 넓어지게

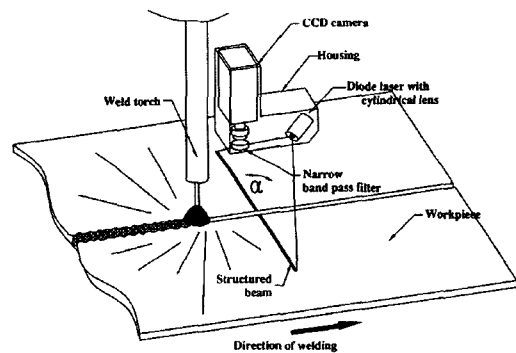


Fig. 2 Configuration of visual sensor

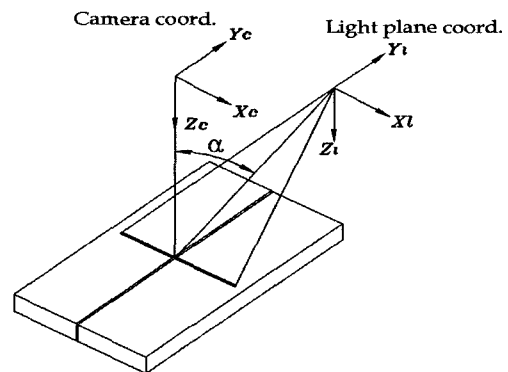


Fig. 3 Coordinate transformation using structured light

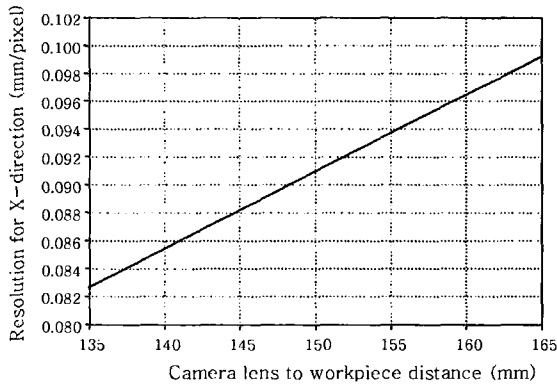


Fig. 4 X-direction resolution due to height variation

되어 X방향에 대한 1픽셀 당 거리가 길어짐을 볼 수 있다. 본 연구에서는 모재를 카메라 렌즈로부터 148mm의 위치에 오도록 설정하여 픽셀 당 분해능이 0.1mm 이하가 되도록 하였다.

3. 화상품질에 영향을 미치는 인자들

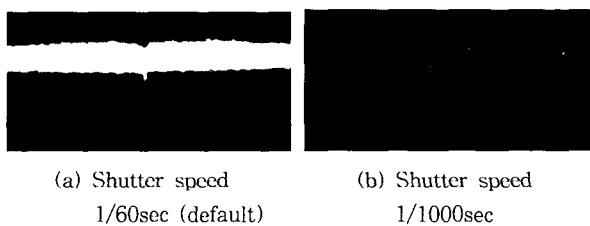
구조화된 빛으로 사용하는 반도체 레이저의 출력, 카메라 조리개의 개폐 정도, 셔터 속도, 모재의 표면(종류) 등이 화상품질에 영향을 미치는 것으로 알려져 있으며⁸⁾, 이들의 영향력을 조사하여 광학적 조정변수를 설정하는데 적용하였다.

3.1 카메라 전자셔터 속도

Fig. 5는 동일한 레이저 강도와 조리개에 대하여, 셔터 속도를 1/1000초로 아주 짧게 하였을 때 1/60초로 한 경우에 비해 CCD 감광 소자에 들어가는 빛의 양이 줄어들어 전반적인 화상의 밝기가 저하된 것을 볼 수 있다. 반면, 카메라의 전자셔터 속도를 1/1000초로 하였을 때 화상에 나타나는 스페터의 궤적의 길이가 아주 짧게 나타나므로 스페터에 의한 노이즈를 줄이는데 크게 기여하는 것을 알 수 있다.(Fig. 6)

3.2 레이저 강도와 조리개

Table 1은 카메라의 조리개를 일정하게 열어놓은 상



(a) Shutter speed 1/60sec (default) (b) Shutter speed 1/1000sec

Fig. 5 Comparison of images according to the shutter speed

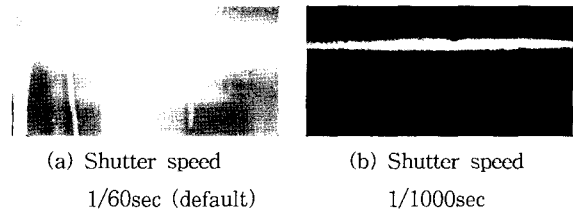


Fig. 6 Spatter trace on the image according to the shutter speed

Table. 1 Processed average gray level of laser stripe according to laser output (On mild steel, Iris No. 4.0)

Threshold Value = 60			
captured images	average gray level	sum of gray level	num of pixels
A	64.75	259	4
B	80.36	50629	630
C	115.45	220042	1096
D	147.77	372668	2522
E	181.04	543122	3000
F	200.61	731033	3644

태에서 연강(mild steel)에 반도체 레이저의 강도만을 6단계로 변화시켜가면서 잡은 화상에 대하여 레이저 띠 부분의 평균 그레이 레벨을 조사하여 레이저의 강도로 나타낸 것이다. 각각의 화상에서 레이저 띠로서 인식될 수 있다고 여겨지는, 그레이 레벨이 60이상인 픽셀들의 수를 알아내고, 그 픽셀들의 그레이 레벨 값을 모두 합하여(sum of gray level) 해당 픽셀 수로 나눈 값이 레이저 띠로 여겨지는 픽셀들의 평균 그레이 레벨(average gray level)로 정의하였으며, 이 값을 레이저의 강도를 대변하는 값으로 하였다. 이 때 카메라 조리개(iris)의 값은 4로 고정하였고 전자셔터의 속도는 1/1000초이다.

Table 2는 연강에 반도체 레이저 출력과 조리개 개폐 정도를 변화시켜 가면서 여러 화상의 그레이 레벨을 비교한 것이다. 본 실험에서는 이 그래프를 근거로 레이저 띠의 평균 그레이 레벨을 150 정도, 조리개는 4로 정하였다.

3.3 모재의 종류

구조화된 빛으로 조사되는 레이저가 같은 강도를 가지더라도 반사되는 모재의 종류에 따라서 화상에 많은 영향을 미친다. 녹이 난 강철, 구리, 알루미늄에 대해서

Table. 2 Processed average gray level on mild steel

Threshold Value = 60							
Laser intensity	A	B	C	D	E	F	
Iris	1.4	86.37	115.08	195.21	204.28	203	203.36
	2	79	138.01	183.96	199.70	204.19	204.41
	2.8	70.73	107.92	119.45	183.86	203.63	205.06
	4	64.75	80.36	115.45	147.77	181.04	200.61
	5.6	0	72.95	94.25	118.64	154.09	186.54
	8	0	66.07	82.84	91.63	119.27	149.60
	11	0	0	75.89	80.16	100.57	121.84
	16	0	0	75.47	72.54	87.56	103.95

Table 2의 연강에서와 같은 방법으로 실험하였다. Fig. 7은 같은 레이저 강도일 때 조리개 값을 4로 하고, 전자셔터의 속도를 1/1000초로 했을 경우 각각의 모재에 대해 얻은 화상을 비교한 것이다. 그림에서 보는 것과 같이 동일한 레이저 강도를 가지더라도 반사되는 모재에 따라 화상품질이 달라지게 된다. 따라서 모재의 종류가 달라질 경우 레이저 강도를 변경하거나 레이저 피로 인식하는 그레이 레벨 값을 바꿀 필요가 있다.

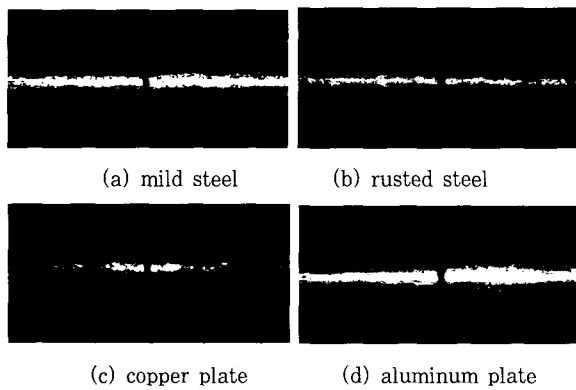


Fig. 7 Comparison of images according to materials

Table 3 Laser intensity average gray level on materials at Iris=4.0

Threshold Value = 60							
Laser intensity	A	B	C	D	E	F	
materials	mild steel	64.75	80.36	115.45	147.77	181.04	200.61
	rusted steel	0	66.06	82.52	99.55	143.42	178.17
	Cu plate	67.33	104.69	113.70	108.64	129.33	153.74
	Al plate	123.94	140.85	157.52	173.57	189.37	191.57

Table 3은 조리개 값이 4, 전자셔터의 속도가 1/1000초일 때의 각각의 모재에 대한 화상에서 레이저 피의 그레이 레벨 평균을 비교한 것이다.

Fig. 8은 연강, 녹이 난 강판, 구리, 알루미늄에 대하여 용접선 인식이 가능하다고 판단되는 영역을 그래프로 나타내어 비교한 것이다. 빗금친 영역이 맞대기 용접선의 위치를 인식할 수 있다고 판단되는 영역이다. 그림에서 볼 수 있듯이 녹이 난 강철에서는 레이저의 강도(출력)를 크게 하든지 아니면 조리개를 많이 여는 것이 필요하다. 알루미늄은 670nm 파장의 광선에 대해 강철보다 반사율이 높으므로 반사광의 강도가 높을 것이고, 당연히 화상에서 그레이 레벨이 큰 값을 가지게 될 것으로 예측할 수 있으며, Fig. 8(b)에 나타난 결과에서도 같은 경향을 볼 수 있다. 따라서 알루미늄에서는 강철에서 보다 레이저의 강도를 작게 하거나 조리개를 적게 여는 것이 적당하다.

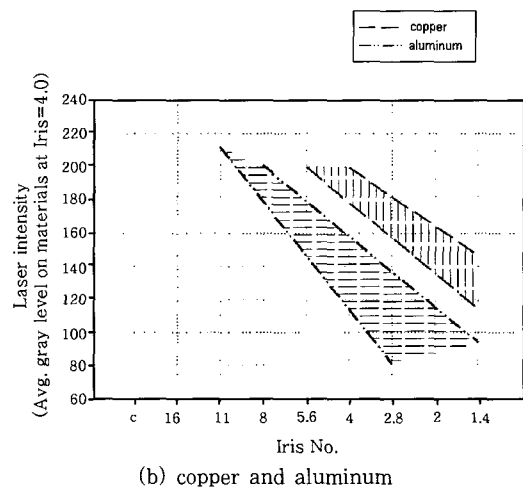
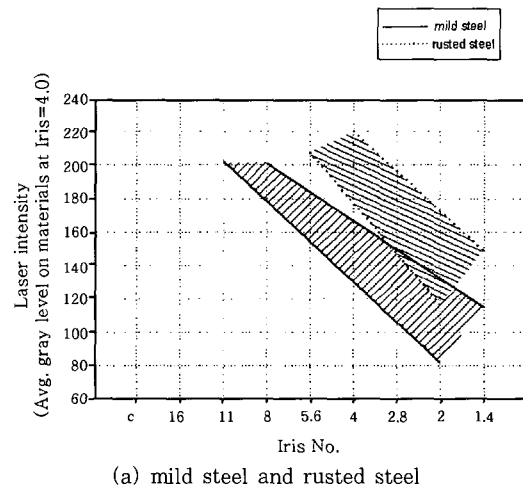


Fig. 8 Correlation of laser intensity and iris no. according to the metal plate

4. 화상처리 및 용접선 추적 실험

4.1 화상 처리 방법

본 시스템에서의 화상처리는 용접시 화상이 포함하고 있는 모재, 아크, 스파터, 레이저 가운데 구조화된 빛인 레이저를 구별하여 적당한 이미지 처리 과정을 거쳐 원하는 특징점들을 추출하여 최종적으로 모재에서 용접선에 대한 일련의 정보를 끌어내는 것을 목적으로 한다. 본 연구에서는 640×480 픽셀의 화상에서 데이터 처리량을 적게 하여 화상처리에 걸리는 시간을 줄이기 위해서 화면의 전부를 사용하지 않고, 용접선이 주로 위치한 400×200 픽셀의 관심영역(region of interest : ROI)을 선택하였다.

(1) 레이저 띠의 추출

본 연구에서 관심영역 내에서 레이저 띠 부분을 추출하는 방법은, 일곱 개의 임의의 칼럼을 정하여 세로방향으로 3개의 픽셀로 이루어진 윈도우를 정하고, 그 윈도우를 칼럼의 상단에서 하단으로, 하단에서 상단으로 각각 이동시키면서 윈도우 내에 존재하는 픽셀들의 평균이 레이저 띠로 여겨질 수 있는 일정한 값을 가지는 두 지점 사이를 레이저 띠의 위치로 결정하였다. 이렇게 결정된 범위 내에서만 용접선으로 인식되는 지점을 찾게 된다. Fig. 9는 이 방법을 이용하여 화상에서 레이저 띠 부분을 추출하는 과정을 나타내고 있다.

(2) 모재의 높이변화

모재의 높이변화가 있으면 Fig. 1에 나타난 바와 같이 화상에서 레이저 띠의 위치가 변하게 된다. 앞서 설명한 방법으로 레이저 띠를 추출한 후 그 중심의 위치(화상 y축)를 구하고, 중심 위치에 해당하는 카메라-모재간 거리를 계산하여 얻을 수 있다. 이 카메라-모재간 거리로부터 모재의 높이 및 높이 변화량을 구하여 실시간 제어에 이용하게 된다.

(3) 용접 접합부(용접선) 추출 알고리즘

맞대기 I형 조인트는 강한 레이저 띠의 가운데에 가

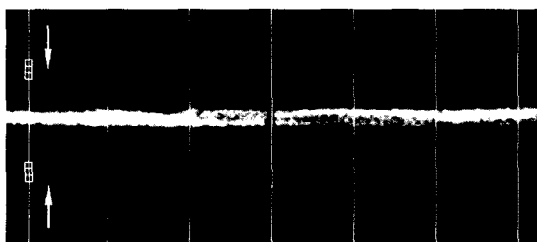
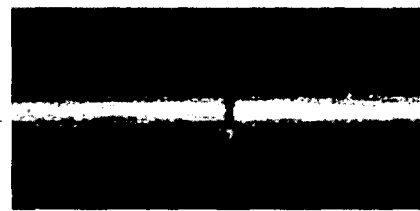


Fig. 9 Method of drawing out laser stripe from ROI

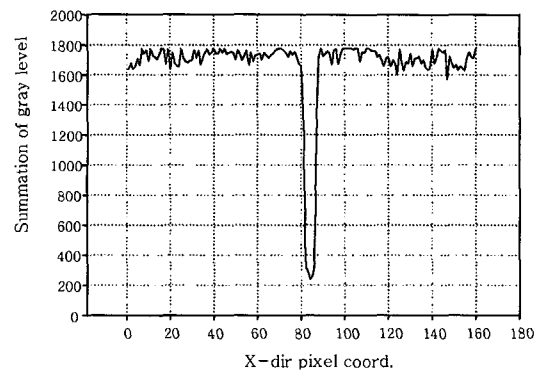
늘고 강도(intensity)가 약한 직선으로 나타난다. 레이저 띠로 추출한 부분의 각 칼럼별 그레이 레벨의 합을 구하고 그 값들의 분포를 살펴보았다. 예로 Fig. 10에 나타난 화상으로부터 추출한 레이저 띠 부분의 각 칼럼에 대한 그레이 레벨의 가장 낮은 값을 보이는 지점을 구하고자 하는 용접선의 중심이 된다. 단순히 그레이 레벨의 합의 최소값을 구하여 용접선의 위치를 구할 수도 있으나 임의의 노이즈나 외란에 의해 용접선 부분이 아닌 다른 부분에서 최소값이 나올 수도 있으므로 이에 대한 대책으로 중심차분법을 적용하였다. 중심차분값은 다음과 같이 구하며, 가장 큰 중심차분값을 갖는 위치가 용접선의 위치이다⁷⁾.

$$Diff_{cent} = \frac{I(i-k) + I(i+k) - 2I(i)}{2 \times k} \quad (1)$$

여기서, I(i)는 i번째 칼럼의 그레이 레벨의 합이고 k는 중심차분구간이다. 중심차분법은 변곡점의 위치를 찾는 데 유용하게 이용되며, k 값이 너무 작으면 미세한 변곡점에 대해 중심차분값이 민감하게 변화하고, k 값이 너무 크면 변곡점에 대해 중심차분값이 둔감하게 나타난다. 즉, k 값이 너무 작으면 외란(noise)에 의한 영향을 받을 수 있으며 k 값이 너무 크면 특징점(변곡점) 위치의 정밀도가 떨어지게 되므로 적당한 중심차분구간을 찾는 것이 중요하다. 실제에 있어서 맞대기 용접선은 여러가지 크기의 틈새(gap)를 가진 것과 임의



(a) Typical image of the region of interest



(b) Gray level summation of laser stripe

Fig. 10 Gray level summation of the typical image

의 각도로 기울어진 용접선도 있으므로 그러한 경우들에 대하여도 중심차분법의 적용이 적절한지를 알아보았다. 우선 틱새가 최소 0.05mm인 것과 0.1mm부터 0.1mm 간격으로 틱새를 넓히면서 최대 1.0mm까지의 틱새가 있는 화상에 대하여 4에서 10까지 중심차분 구간을 바꾸어 가면서 적용하였으며, 기울어진 용접선에 대해서는 5°, 10°, 20°로 변화시켜 가면서 조사하였다. 여러가지 화상에 대하여 조사한 결과 중심차분 구간이 6일 때 외란의 영향을 받지 않고 특징점 위치의 정밀도를 유지하는데 적합한 것으로 판단되었다.

4.2 실험 장치

본 실험에 사용된 장치는 용접 토치를 장착한 3축 직선 서보이송장치, GMA 용접기, 시각센서, PC로 구성된다. 실험 중 모재의 열변형을 최소한으로 줄이기 위해 모재를 고정하는 지그를 사용하였다. 각 축은 AC 서보모터(1000pp/rev)로 구동된다. 각 축의 모터제어를 위해서 PIT8253 및 PPI8255를 이용하여 제작한 펄스 발생기를 사용하였다.

4.3 실험방법

실험방법은 비전센서로부터 감지된 화상을 비전보드를 통해 PC로 받아들이고 640×480 크기의 화상으로부터 400×200 크기의 관심영역을 정의한 후, 그 관심영역 내에서 레이저 띠를 추출하고 레이저 띠 부분 내에서 높이 제어를 위한 y픽셀 데이터를 구하고 중심차분법을 이용하여 용접 조인트의 위치를 구한다. 먼저 추출하고자 하는 레이저 띠가 관심영역 내에 있고 그 띠에 용접 시작점이 있으면, 띠 부분을 추출하여 중심차분법으로 용접 시작점의 위치를 찾아내어 센서 및 용접 토치를 용접 시작점에 위치시키면서 선행거리만큼의 위치정보를 먼저 파악하게 된다. 용접 시작 명령을 내리게 되면 용접 진행방향으로 이동하면서 주어진 샘플 주기(sampling time)마다 화상을 받아들여 다음의 조인트 위치정보를 중심차분법으로 구하고 이송해야 할 거리를 계산한다. 이렇게 계산된 이송거리를 3축 직선서보이송장치의 각 축 서보모터로 이송치 만큼의 펄스를 출력시킴으로써 용접선을 추적한다.

4.4 용접선 추적 결과

실험은 초기 용접방향에 대하여 상하각도 3°, 4°, 5°, 10°, 좌우 각도 0°, 5°, 10°, 15° 기울어진 시편에 대하여 용접속도 10mm/s, 12mm/s를 각각 적용하였으며, 실제 용접을 하는 상태에서의 추적성능을 확인하

였다. 용접길이는 각도 변화구간 120mm를 포함하여 총 길이 200mm를 용접하였으며, Fig. 11은 실험에 사용된 모재의 형태를 나타낸 것이다.

용접선 추적실험 결과 각종 실험변수에 대한 추적 최대오차를 Table 4와 5에 나타내었다. 용접선 추적오차는 비전센서에서 인식한 용접부의 위치가 용접선으로부터 벗어난 크기를 나타내며, 대체로 용접속도가 빠를수록, 용접선 기울기 각도가 클수록 최대오차 값이 크게 나타나는 경향을 볼 수 있다. 그러나 실험범위 내인 상하 기울기 각도 10°까지, 그리고 좌우 기울기 각도 15°까지는 최대오차의 범위가 ±0.5mm로 나타나 실제 산업현장에 적용이 가능한 수준인 것으로 판단된다.

Fig. 12는 용접속도 10mm/s로 상하각도 10°, 좌우 각도 10° 인 시편에 대해서 샘플링 주기를 0.1sec로 하고, 용접길이 200mm동안 용접선을 추적한 좌우(x) 방향 편차(Δx), 높이(z)방향 편차(Δz)를 나타낸 것이

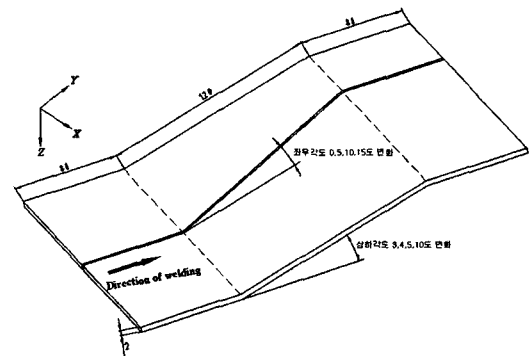


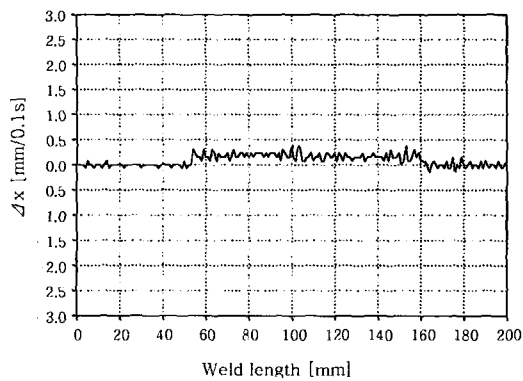
Fig. 11 Shape of specimen for the experiments

Table 4 X-directional weld seam tacking peak error(mm)

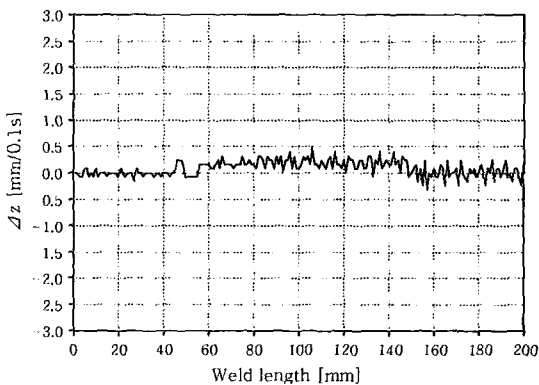
Welding speed 10mm/s	Height inclination angle		Welding speed 12mm/s	Height inclination angle
	5°	10°		5°
Horizontal inclination angle	0°	0.24	-	0.31
	5°	-	0.40	-
	10°	-	0.23	-
	15°	0.20	0.27	0.37

Table 5 Z-directional weld seam tacking peak error(mm)

Welding speed 10mm/s	Height inclination angle		Welding speed 12mm/s	Height inclination angle
	5°	10°		5°
Horizontal inclination angle	0°	0.47	-	0.44
	5°	-	0.33	-
	10°	-	0.38	-
	15°	0.30	0.41	0.50



(a) Calculated weld joint x position from image



(b) Calculated weld joint z position from image

Fig. 12 Tracking result (v :10mm/sec, offset : top and bottom 10°, right and left 10°)

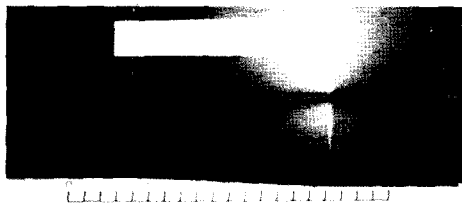


Fig. 13 Photographs of weld seam tracking result (v :10mm/sec, offset :top and bottom 10°, right and left 10°)

다. 추적된 용접선의 궤적은 이들 편차 값의 적분치에 해당한다. Fig. 13은 용접선 추적을 실험한 시편의 사진이다.

5. 결 론

높이변화가 있으면서 입체적 특징 형상을 갖지 않는 I형 맞대기 용접선 추적용 시각 센서 시스템에 관한 연구로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 대역 필터를 장착하고, 카메라의 전자셔터 속도를 1/1000초로 빠르게 적용시킴으로써 화상 내에서 용접 중에 다량 발생하는 스패터의 영향을 저감시킬 수 있었다.

(2) 구조화된 빛의 광원인 레이저의 강도와 카메라의 조리개 개폐정도, 그리고 모재의 종류가 화상품질에 미치는 영향을 분석하여 용접선 인식에 적합한 변수들의 영역범위를 제시함으로써 광학계설계에 대한 기초자료를 제시하였다.

(3) 화상으로부터 그레이 레벨의 중심차분값을 이용하여 I형 맞대기 이음부를 추출하여 용접선의 위치를 검출할 수 있었다. 아울러 레이저 띠의 중심위치를 통해 모재의 높이를 구할 수 있었으며, 이것을 적용하여 높이 변화가 있는 I형 맞대기 용접선을 추출할 수 있는 알고리즘을 적용하여 용접선을 추적할 수 있었다.

(4) 비교적 간단한 알고리즘과 화상처리기법을 이용하여 짧은 샘플링 타임으로 좌우방향은 물론 높이변화가 있는 용접선 추적에의 적용가능성을 확인할 수 있었다.

후 기

이 논문은 2003년도 BK21 사업에 의하여 지원되었음.

참 고 문 헌

1. G. E. Cook :Robotic Arc Welding - Research in Sensory Feedback Control, IEEE Trans. on Industrial Electronics, IE30-3, 1983, 252-268
2. J. Beattie, S. K. Cheng, and P. S. Logue :The Use of Vision Sensors in Multi-pass Welding Applications, Welding Journal, 67-11 (1988), 28-33
3. J. E. Agapakis, K. Masubuchi, and N. Wittels :General Visual Sensing Techniques for Automated Welding, Proceedings of 4th Int'l Conf. on Robot Vision and Sensory Controls, London, 1984, 103-114
4. C. W. Lee, S. J. Na :Vision Sensor for Welding Automation, Journal of KWS, 11-3 (1993), 10-21 (in Korean)
5. K. Y. Bae, J. H. Lee, :A Study on Development of Automatic Weld-seam Tracking System Using Vision Sensor, Journal of KWS, 14-4 (1996), 79-88 (in Korean)
6. J. H. Jun, T. D. Cho, S. M. Yang :A Study on Automatic Seam Tracking using Vision Sensor, Annual Autumn Meeting of KSPE, Suwon, (1997), 1105-1109 (in Korean)
7. K. C. Chung, J. W. Kim :A Study on the Image Processing of Visual Sensor for Weld Seam Tracking in GMA Welding, Journal of KWS, 18-3 (2000), 60-67 (in Korean)
8. S. Nakata, J. Huang, Y. Tsuruha, T. Kobashiri, Y. Makino :Determination on Geometrical Arrangement of Optical Equipments and Photographic Parameters for Construction of Visual Sensing System, Trans. of the JWS, 7-3 (1989), 74-78 (in Japanese)
9. S. Nakata, J. Huang :Construction of Visual Sensing System for In-process Control of Arc Welding Process and Application in Automatic Weld Line Tracking, Trans. of the JWS, 7-4 (1989), 45-50 (in Japanese)