

# 비전센서를 이용한 용접선 자동추적장치에 관한 연구

## A Study on Automatic Seam Tracking using Vision Sensor

전진환(충남대 대학원) , 조택동(충남대 공대), 양상민(충남대 대학원)

J. H. Jun(Chungnam Univ), T. D. Cho(Chungnam Univ), S. M. Yang(Chungnam Univ)

### ABSTRACT

A CCD-camera, which is structured with vision system, was used to realize automatic seam-tracking system and 3-D information, which is needed to generate torch path, was obtained by using laser-slip beam. To extract laser stripe and obtain welding-specific point, Adaptive Hough-transformation was used. Although the basic Hough transformation takes too much time to process image on line, it has a tendency to be robust to the noises as like spatter. For that reason, it was complemented with Adaptive Hough transformation to have an on-line processing ability for scanning a welding-specific point. The dead zone ,where the sensing of weld line is impossible, is eliminated by rotating the camera with its rotating axis centered at welding torch. The camera angle is controlled so as to get the minimum image data for the sensing of weld line, hence the image processing time is reduced. The fuzzy controller is adapted to control the camera angle

**Key words** : Vision sensor(비전센서), Seam tracking(용접선 추적), Adaptive Hough transform(적용 휴변환), The structured light(구조화된 빛), Fuzzy controller(퍼지제어기)

### 1. 서 론

아크 용접공정은 작업환경이 매우 열악할 뿐만 아니라 용접사의 기능에 따라 품질의 균일성이 많은 차이를 보일 수 있는 민감한 작업이므로, 용접공정의 자동화를 통하여 이 문제의 해결과 동시에 생산성을 모색해 왔다. 그러나 용접공정의 단순 기계화는 다양한 용접선의 모양에 대하여 쉽게 적용시킬 수 없을 뿐 아니라 연속작업으로 인한 고정지므로 부터의 오차는 보정할 수 없다. 아크열에 의한 용접중 모재의 열변형에 의한 경로변화도 보정을 필요로 하는 요인이다. 따라서 용접선 변화에 따른 정보를 용접중 실시간으로 측정할 수 있는 센서가 용접공정의 자동화에 요구된다.

본 논문에서는 여타의 다른 센서에 비하여 다양한 용접 조인트에 유연성있게 적용할 수 있는 시각센서의 장점을 이용하여 용접선 추적 알고리즘을 개발하고자 한다. 이를 위하여, 레이저를 평면형태로 구조화한 평면광을 용접물에 투사하고, 용접물에 투영된 레이저광 영상을 획득할 수 있는 CCD 카메라로 구성된 시각센서<sup>(1,2,3)</sup>를 설계하여 사용하였다. 또한 이 시스템은 카메라가 토치(Torch)를 중심으로 회전할 수 있어 어느 정도의 심한 기울기의 변화를 가진 용접선도 효율적으로 감지하여 추적할 수 있도록 하였다.

### 2. 화상처리 기법과 시스템 모델링

#### 2.1 화상처리

##### 2.1.1 화상처리의 개요

용접시에는 예측이 불가능하고 다양한 변수와 외란이

발생하므로, 이런 예상하지 못한 노이즈를 제거하여 용접변수와 용접경로생성을 위한 데이터를 얻기 위해서는 고기능의 화상처리 테크닉이 필요하다. 뿐만 아니라 화상처리는 시간을 많이 필요로하므로 실시간(On-line)에 적합한 최적의 알고리즘의 개발이 필수적이다. 그러므로 화상처리 시간을 단축시키며, 다양한 노이즈에서도 강한 알고리즘을 개발하는 것이 필수적이라 하겠다.

본 연구에서는 광학 삼각법을 이용하는 레이저 카메라를 이용하였다. 이 방식은 구조화된 빛을 사용하는데 레이저 슬릿빔(평면광)을 모재 표면에 경사지게 조사하고 생성된 평면광과 모재표면과의 교차선인 레이저 stripe을 이용하여 용접변수와 경로를 얻게 된다.

아크광이나 스페터(spatter)등의 노이즈가 실린 영상에서 레이저 stripe만을 추출하기 위해서 적을 선탐색(adaptive line detection)알고리즘을 사용하였다. 그러나 적용형 선탐색 알고리즘을 이용하여 레이저 stripe을 추출하면, 레이저 stripe빔이 손상을 입게 되어 레이저빔이 여러 조각으로 분리되거나 없어지게 된다. 이 상태의 레이저 stripe만으로는 용접 특징점을 얻기란 거의 불가능한 일이다. 따라서 손상된 레이저 stripe빔을 용접 특징점을 얻기 위한 적합한 상태로 변환을 해야한다.

손상데이터의 복구와 용접특징점을 찾기 위한 변환(transformation)으로 영상처리 알고리즘중 적용휴변환(Adaptive hough transform)을 이용하였다.

##### 2.1.2 레이저 stripe추출

카메라 전반부에 협대역통과필터( $690 \pm 10nm$ )를 사용하지만 아크광은 백색광이므로 그 대역의 파장의 빛은 stripe빔과 함께 CCD의 셀에 반응(Active)하므로 아크광, 스페터, 겹반사등을 효율적으로 필터링 할 수 있는 알고리즘이 필요하다. 레이저 stripe빔은 이들 노이즈들

과 분리될 수 는 특징을 가지고 있다. 그 특징으로, 레이저 stripe은 일정한 두께를 가지고 있고 광도(intensity)는 반 가우시안 분포(Half gaussian distribution)를 가지고 있으며, 스페터는 대부분 레이저 stripe 범에 수직으로 존재한다. 따라서 위에서 설명한 특징들 중 광도의 반 가우시안 분포의 성질을 이용하면 어느 정도의 노이즈를 제거할 수 있다. 이런 특성을 더 확실히 구분하기 위해서 영상 데이터를 완전 가우시안(Full Gaussian)분포로 변환할 필요가 있다. 이를 위해서 영상 처리 기법중 인근 평균 방법(Neighborhood averaging)를 사용한다. 본 논문에서는 레이저 빔이 화면의 수평 방향으로 존재하기 때문에, 레이저 strip의 광도를 가우시안 분포로 만들기 위해서  $x$  방향으로만 인근평균법을 적용한다. 따라서

$$g(x, y) = \frac{1}{N} \sum_{n \in S_x} f(n) \quad (1)$$

위와 같은 식이 된다. 여기서  $f(n)$ 는 영상내의 광도이며,  $g(x, y)$ 는 인근평균값이다. 다음으로 반 이진화(Half threshold)처리를 한다. 본 논문에서는 광도의 가우시안 분포의 특징을 이용함으로 어느  $t_c$ 값 이상의 값은 가우시안 분포를 유지하고  $t_c$ 값 이하가 되는 부분은 0 값으로 처리한다. 다음 그림(Fig.1)은 이러한 방법으로 처리한 결과이다. 다음 단계로 레이저 stripe에서만 작은 반응값을 갖는 컴벌루션 마스크(convolution mask)를 생성한다. 이 컴벌루션 마스크는 용접선 추적이 시작되기 전에 생성하여 메모리에 저장하여 용접선 추적전체 공정에서 쓰인다. 아크광이 없는 상황에서 레이저 stripe빔을 스캐닝(scanning)하여 빔의 광도 분포를 알아낸다. 이때 고려 할 사항은 레이저 stripe 빔이 용접모재의 경사면에서 레이저 두께가 좁아진다는 점이다. 실험 결과 용접모재의 경사면에 따라 상당한 차이가 있었으나 실험에서 좋은 성능을 보인 두께비(레이저 stripe이 경면에 조사될 때의 폭과 평면에 조사될 때의 폭의 비)의 값은 65%정도였다. 이때 주의 해야할 사항은 두께비를 너무 많이 줄이게 되면 스페터나 용접모재의 경면에 비치게 되는 겹반사도 레이저 stripe으로 인식하게 되며 너무 높게 되면 경면에서 광도가 줄어든 레이저 stripe을 인식하지 못하게 되어 용접 특징점을 인식하지 못하게 된다. 그래서 레이저광의 분포를 스캔한 다음 이 레이저 분포의 폭을 65%로 줄여서 최종 컴벌루션 마스크를 만든다.

$$g(x, y) = f(x, y) * M(x) \quad (2)$$

$$= \sum_{x=-\frac{M}{2}}^{\frac{M}{2}} (f(x, y) - M(x))^2$$

$$F(x, y) = \begin{cases} 1, & g(x, y) \leq t_{con} \\ 0, & g(x, y) > t_{con} \end{cases} \quad (3)$$

여기서 \*는 컴벌루션을 나타내는 기호이고  $f(x, y)$ 는 화상데이터의 광도이며,  $M(x)$ 은 위에서 설명한 방법에 의해서 구한 광도마스크이다.  $g(x, y)$ 는 컴벌루션의 결

과인데, 만약 레이저 stripe를 컴벌루션했으면 컴벌루션한 값, 즉 화면상의 광도와 기준 레이저띠이 광도와 오차의 제곱승한 값이 다른 아크광이나 스페터를 컴벌루션한 것보다 작은 반응을 보일 값이 될 것이다. 따라서 컴벌루션의 문턱값(threshold),  $t_{con}$ 을 설정하여 최종결과 값  $F(x, y)$ 가 레이저 stripe의 점인가를 판명하도록 하였다.  $F(x, y)$ 은 최종 화면상의 광도값이다.

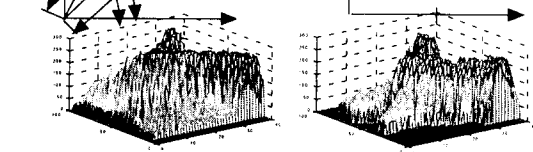


Fig.1 Laser stripe intensity distribution before and after Gaussianization

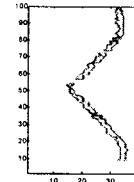


Fig.2 The result of extraction of laser stripe

### 2.1.3 적응휴변환(Adaptive Hough transformation)

Hough변환<sup>(4)</sup>은 영상내에 존재하는 직선 성분이나 임의의 도형을 검색하는 영상처리 알고리즘중에 하나이다. 본 연구에서는 영상내의 레이저 stripe을 검색해야 하기 때문에 직선에 대한 Hough변환을 사용하였다

Fig.3에서 직선은

$$x \cos \theta + y \sin \theta = \rho \quad (4)$$

로 나타낼 수 있으므로  $(\rho, \theta)$ 로 되어 있는 Hough 평면에서는 하나의 직선이 점으로 매핑(mapping)됨을 알 수 있다. 또한 역 변환도 가능하다. 다음 Fig. 4은 Fig.2을 Hough 변환한 것이다.

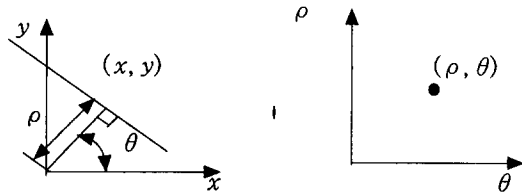


Fig.3 The principle of basic Hough transformation

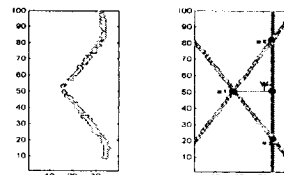


Fig. 4 The result of Hough transformation (V-Type)  
적용 Hough변환은 Hough 변환을 용접선의 추적에 적

합하도록 수정된 알고리즘이다. Hough 변환은 구하고자 하는 직선의 파라메타(Parameter)들의 정보, 즉  $\rho$ ,  $\theta$  가 어느 정도 주어지지 않았을 때는 그 직선을 구하기 위해서는 전영역의  $\rho$ ,  $\theta$ 를 증가시켜가며 직선을 검색하여야 하기 때문에 많은 처리시간이 필요로 하는 단점을 가지고 있다. 위 식(4)에서 알 수 있듯이 ( $\rho$ ,  $\theta$ )를 이용하여 직선을 검색할 때는 계산 시간이 많이 소요되는 삼각함수를 이용하기 때문이다. 그래서 이런 단점을 보완하기 위해서 본 논문에서는  $\sin$ ,  $\cos$ 의 삼각함수를 화상처리가 시작되기 전에 0.05도의 간격으로 수표(Number table)을 생성하여 화상처리 동안 삼각함수를 계산하는 시간을 줄였다. Hough 변환에서는 검색하고자 하는 직선의  $\rho$ ,  $\theta$ 를 어느 정도만 알고 있으면 정확한 직선의 파라메타들을 빠른 시간 안에 구할 수 있다. 처리 속도를 높이기 위해서는  $\rho$ ,  $\theta$ 의 검색 범위를 더 축소시켜면 될 것이다. 이것이 적용변환의 핵심으로서 전 단계의  $\rho$ ,  $\theta$ 의 파라메타를 이용하여 다음 단계의 직선을 검색하는데 이용하는 것이다. 즉 전 단계의 파라메타( $\rho_{pre}$ ,  $\theta_{pre}$ )를 중심으로 좌우에 작은 범위에 오프셋(offset)을 주어 검색 범위로 설정하여 다음 단계의 직선을 탐색하는데 이용한다. 이 범위에 검색하고자 하는 직선의 파라메타들이 존재하면 직선을 성공적으로 검색할 수 있게 된다. 전 단계의 직선의 파라메타들을 이용하여 다음단계의 직선을 검색하는데 이용하기 위해서는 다음과 같은 용접선의 특징들이 있기 때문이다. 대부분의 용접작업을 고려해 볼 때 용접홈(welding groove)의 형태는 거의 일정하고, 용접 모재 단면의 형상이 급작스럽게 변화하지 않는다. 위에서 서술한 용접선의 특징을 Hough변환에 적용하면 처리 속도는 물론 아크광과 스펙터등의 노이즈에도 강한 레이저 stripe탐색 성능을 갖도록 할 수 있다.

Hough 평면에서 전 단계에서 구한 Hough변환점을 중심으로 반지름  $R$ 의 문턱값(threshold)을 두어 다음 단계에서 반지름  $R$  주위의 점 ( $\rho_r$ ,  $\theta_r$ )만을 Hough 변환 범위로 설정하여 직선의 파라메타를 검색한다. 그림(Fig. 5)에서 볼 수 있듯이 프로세싱 전 단계의 직선을  $l_1$  이 라하고 다음단계를  $l_2$ 라 하면 Hough 평면에서 다음 단계에서 직선( $l_2$ )의 Hough 평면 파라메타

( $\rho$ ,  $\theta$ ) 가 반지름  $R$ 인 원에 존재할 조건은

$$\begin{aligned} \Delta\theta &= \theta_1 - \theta_2 \\ \Delta\rho &= \rho_1 - \rho_2 \\ -R &\leq (\Delta\theta, \Delta\rho) \leq R \end{aligned} \quad (5)$$

이다. 위의 조건을 만족하게 되면 다음 단계에서 직선  $l_2$ 를 Hough변환하여 직선의 파라메타를 검색할 수 있게 된다. 이렇게 됨으로써 반지름  $R$ 안에 속하는 모든 직선이 Hough 변환시 고려가 된다. 이런 반지름  $R$ 의 문턱값(threshold)을 용접선의 기울기 변화와 용접 단면(profile)의 기울기 변화를 고려하여 적당히 설정하면 시

간 낭비를 초래하는 회상처리 시간을 줄일 수 있게 된다.

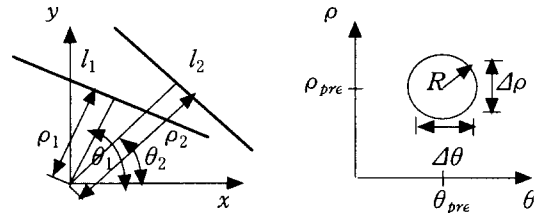


Fig.5 The condition to detect the line  $l_2$  using the previous Hough parameter

## 2.2 카메라 각도제어

CCD카메라의 중심이 항상 용접점 위에 있도록 제어하기 위해 dc서보전동기를 사용하여 CCD카메라를 토치중심으로 회전하도록 실험장치를 설계하였다. 카메라가 토치를 중심으로 회전함으로써 얻을 수 있는 장점은 기하학적으로 센싱이 불가능한 사역(dead range)없이 어떤 용접선의 변화에도 용접선의 센싱이 가능하기 위함이다. 그래서 기울기 변화가 복잡한 용접선도 추적이 가능하고 또한 용접 특징점을 찾기 위한 최소한의 영역의 영상 데이터만을 얻을 수 있으므로 영상처리 시간을 단축시키는 역할도 한다. 이것은 용접 특징점을 검색하기 위한 최소한의 영상만을 얻도록 카메라를 최선의 위치로 회전시키기 때문이다. 이에 대한 전제조건으로는 dc서보전동기의 회전각 제어가 정확해야 하는데 이는 회전각제어에 오차가 많이 발생하게 되면 매 샘플링 마다 누적되어 시간이 지남에 따라 토치의 궤적이 용접선의 경로를 벗어나게 되고 용접을 하지 못하게 되기 때문이다. 본 연구에서는 시스템 사용자의 경험과 지식을 바탕으로 시스템을 모델링할 수 없거나 시스템의 비선형성을 고려할 수 있는 퍼지제어(Fuzzy control)를 적용하여 dc 서보전동기를 구동하였다. 2입력 1출력을 갖는 퍼지제어기로서 오차와 오차변화를 입력하고 dc 서보 전동기를 구동하는 입력 전원을 출력으로 사용하였다.

제어룰로서 구현되는 입력집합과 출력집합간의 관계(on)는 Mamdani가 제안한 퍼지함의(fuzzy implication)를, 추론방식은 최대최소연산방법(min-max operation)을 사용하였다. 또한 귀속도함수(membership function)나 규칙표(rule base)를 구하기 위해서 전산모사를 수행하였다.

## 2.3 좌표변환

입체광을 용접 모재에 투사하고 그 반사광을 CCD 카메라로 받아들여 용접 개선 변수를 측정하였다. 카메라로부터 받아들여진 영상 데이터는 2차원 정보이며 이로부터 3차원인 용접 개선(groove)변수를 계산하기 위해서는 추가적인 정보가 필요하다. 여기서 필요로하는 추가적인 정보는 원통형 렌즈(cylindrical lens)를 사용하여 얻어진 광면의 방정식(equation of light plane)에 의하여 구해진다. Fig.6으로부터, 광면의 방정식을 world좌표로 나타내면

$$Y_r = C_1 + C_2 \cdot Z_r \quad (6)$$

가 된다.

여기서,  $C_1 = y_0 + z_0 \cdot \tan \varphi$ ,  $C_2 = -\tan \varphi$  이다.

카메라 모델로부터

$$X_c = \frac{x}{\lambda} \cdot (\lambda - Z_c) \quad (7)$$

$$Y_c = \frac{y}{\lambda} \cdot (\lambda - Z_c) \quad (8)$$

이고 위식으로부터 영상 좌표(image coordinate)  $x$ ,  $y$ 와 world좌표계  $X_c, Y_c, Z_c$ 와의 관계는

$$X_c = \frac{x(C_1 + C_2\lambda)}{C_2\lambda + y} \quad (9)$$

$$Y_c = \frac{y(C_1 + C_2\lambda)}{C_2\lambda + y} \quad (10)$$

$$Z_c = \frac{\lambda(y - C_1)}{C_2\lambda + y} \quad (11)$$

로 구해진다.

그러나 본 연구에서는 카메라가 토치를 중심으로 회전하므로 좌표의 변환이 필요하다. ( $X_c, Y_c, Z_c$ )는  $z$ 축을 중심으로 하는 회전변환(rotation transformation)을 거쳐 전체좌표계 ( $X, Y, Z$ )에서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(90-\phi) & \sin(90-\phi) & 0 \\ -\sin(90-\phi) & \cos(90-\phi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_t + L\cos(\phi) \\ Y_t + L\sin(\phi) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

여기서

$X_t, Y_t$  토치의 위치,  $L$  토치와 카메라 사이의 거리,  $\phi$  카메라의 회전각도이다.

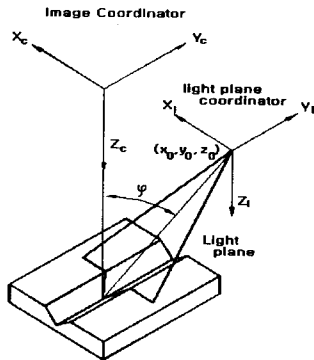


Fig. 6. The image and light plane coordinate

### 3. 실험

#### 3.1 카메라 각도제어

용접선 추적에 있어 용접선 기울기 변화 때문에 각도오차 변화에 따른 카메라 구동부의 정착시간(setting time)과 오버슈트(overshot)등의 성능이 얼마나 만족되는지 평가하기 위해 다양한 각도오차를 퍼지제어기에 주어 실험하였다. dc서보전동기에 타이밍 벨트를 걸어 카메라, 다이오드레이저, 줌렌즈등이 장착되어 있는 마운트부의

각도를 제어하여 보았다. 기울기 변화가 거의 없는 용접선의 각도추적을 시험하기 위해 작은 각도오차를 실험해 보았고 sin 파동의 제어각도가 심하게 변하는 용접선 추적제어성능을 평가하기 위하여 제어각도를 크게 퍼지제어기에 주어 성능을 평가해보았다. 그리고 퍼지제어기의 성능을 PID제어기와 비교하여 보았다.

#### 3.2 용접선 추적실험

용접선은 sine파경로로 된 V-groove와 직선경로된 V-groove를 사용하였다. 직선으로된 용접시편을 X-Y table의 X방향에 각각 12°, 20°, 30° 각도로 하고 실험하였다. sine파로 된 V-groove는 주기가 240mm이고 피크(peak)는 ±40mm인 기울기 변화가 큰 용접시편을 사용하였다. 한 샘플링당 최대 영상처리 시간은 0.22초가 소요되므로 영상 샘플링 시간을 0.3초로 하여 용접 토치의 속도를 8mm/sec로 하였다.

## 4. 실험결과 및 고찰

#### 4.1 카메라 각도제어

퍼지제어기(Fuzzy controller)와 PID제어기에 다양한 각도의 계단입력(step)신호를 주어진 결과 Fuzzy제어기는 각도의 크기에 거의 상관없이 빠른 응답속도를 보였을 뿐만 아니라 오버슈트(overshot)도 거의 존재하지 않았다. 실험결과 Fuzzy제어기는 본 시스템에서 구성된 용접선 자동추적 시스템의 CCD 카메라각도제어에 적용함으로 카메라 각도오차를 최소화하면서 용접선을 추적할 수 있는 가능성이 큰 것을 알 수 있었다.

#### 4.2 영상처리

영상처리에서 가장 문제되는 것은 영상처리 시간이라 할 수 있다. 본 연구에서 제안한 적응 휴변환(Adaptive Hough transform)으로 영상을 처리하여 용접점을 인식하는데 소요되는 시간은 최대 0.22초였다. 이 영상처리 시간은 아크용접의 속도가 5-10 mm/sec인 저속에 대하여 속도에 대하여서는 실시간 응용하기에 충분한 시간으로 판단된다.

#### 4.3 용접선 추적실험

용접선의 기울기변화가 12° 인 용접선의 추적실험에서는 토치가 용접선에서 0.3mm의 작은 오차범위를 유지하면서 용접선 경로를 추적하였다. 그보다 기울기 변화가 큰 20° 경우는 0.6 mm의 오차범위를, 30° 에서는 0.8mm의 오차범위를 유지함을 알 수 있었다. 기울기 변화가 클수록 오차범위가 커짐을 알 수 있었다. 용접모재의 용접선 기울기를 크게 하게 되면 용접모재의 경면에 반사되어 CCD 카메라로 투영되는 레이저 stripe의 두께가 심하게 일그러지거나, 레이저의 광도가 떨어져 레이저 stripe의 추출결과가 좋지 않은 경우가 발생하여 Hough 변환시 정확한 용접점을 검색하지 못하게 된다. 이 오차는 다이오드레이저를 경사면에 수직되게 조사하도록 2개의 다이오드레이저를 사용하면 어느 정도의 오차는 충분히 더 감소시킬 수 있지 않을까가 생각된다.

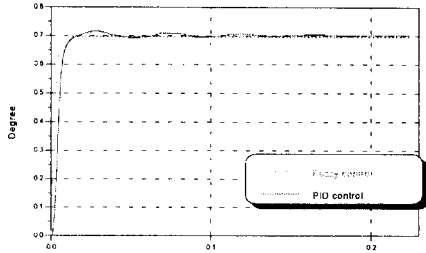


Fig.7 The responses of fuzzy and PID controller on 0.7 degree angle input (experimental)

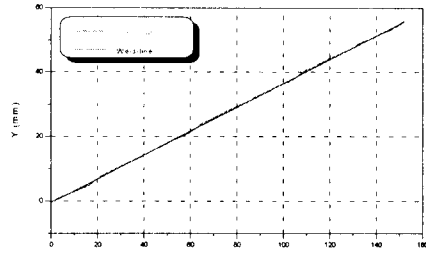


Fig.8 Experimental result of 20° slanted weld line

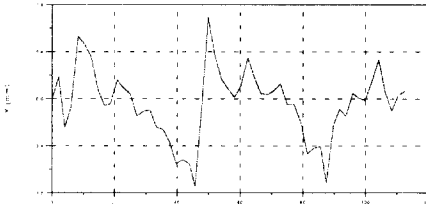


Fig. 9 The trace-error of 20° slanted weld line

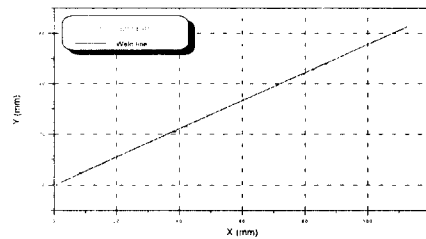


Fig.10 Experimental result of 30° slanted weld line

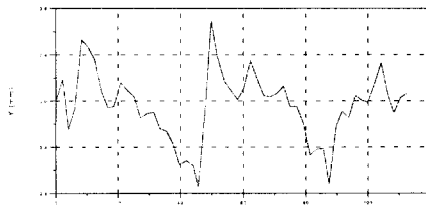


Fig. 11 The trace-error of 30° slanted weld line

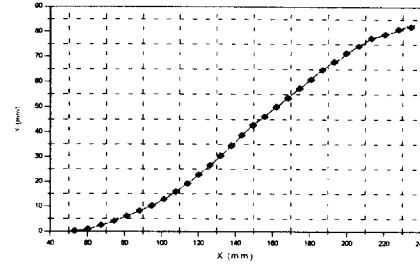


Fig. 12 Experimental result for weld line

$$(y=40 \sin \frac{\pi x}{240} \text{ mm})$$

## 5. 결 론

본 연구에서 제안한 용접선 자동적 추적장치에 크게 두 가지 알고리즘을 적용하였다. 그 하나는 영상 내에서 레이저 stripe을 검색하는데 적용한 적응휴변환(Adaptive Hough transformation)이며, 나머지 하나는 용접점을 인식하는데 필요한 영상을 잡는데 가장 최선의 위치로 카메라를 제어하는데 쓰인 퍼지제어기(Fuzzy controller)이다.

이 두 알고리즘 적용함으로써 다음과 같은 결론을 도출하게 되었다.

- 적응 휴변환을 이용한 용접점 검색 알고리즘에서 기대했던 처리속도는 용접선 추적을 실시간(On-line)으로 처리할 만큼의 충분한 시간이었다. 영상 보드에서 데이터를 얻어 토치의 궤적점을 X-Y데이터로 전송하는데 걸리는 처리시간은 최대 0.22초였다. 영상보드에서 컴퓨터의 메모리로 데이터를 전송하는데 소비되는 시간(0.11초)를 가만하면 실제 영상처리시간은 0.11초안에 끝나게 되는 셈이다. 영상보드에서 CPU의 메모리로 데이터를 전송하는데 소비되는 시간이 필요 없는 영상 보드를 사용한다면 고속 용접선 추적에도 본 논문에서 제안한 알고리즘의 적용이 가능하리라 사료된다.

- 실험결과에서 토치가 용접선 경로를 벗어나는 오차는 용접선 기울기의 변화에 따라 다양하게 나타났지만 기울기의 변환각 12-30도 일 때 오차는 대략 0.3-0.8 mm 정도 이내였다. 실제 로봇 용접(GMA -Gas Metal Arc)에서 요구되는 정밀도는 대략 0.5mm 정도 이내를 요구함을 생각해 볼 때 위에서 보인 오차는 자동용접에 적합하리라 생각된다.

## 참 고 문 헌

1. Lina G, Shapiro, Robert M. Haralick, "Computer and Robot Vision", Addison-Wesley publishing company
2. 이철원, 나석주, "용접자동화를 위한 시각센서", 대한용접공학회지, pp20-28, Vol. 9, No. 2, Jun, 1991.
3. 김호학, 부강석, 조형식, "자동 아크 용접공정의 용접개선변수 측정을 위한 시각 시스템", 한국용접공학회지, pp58-69, Vol. 8, No. 2
4. Earl. Gose, Steve Jost, "Pattern recognition and Image", Prentice Hall