

## 로봇트 아크용접에서 시각인식장치를 이용한 용접선의 추적

\*손영탁, 김재선, 조형석  
한국과학기술원 정밀공학과

### ABSTRACT

The aim of this paper is to present the development of visual seam tracking system equipped with visual range finder. The visual range finder, which consists of a CCD camera and a diode laser system with line generating optics, developed to recognize the types of weld joints and detect the location of weld joints. In practical applications, however, images of the weld joints are often degraded due to spatters, arc flares, surface specularly, and welding smoke. To overcome the problem, this paper proposes a syntactic approach which is a class of artificial intelligence techniques. In the approach, the type of weld joint is inferred based upon the production rules which are linguistic grammars consisting of a set of line and junction primitives of laser stripe image projected on weld joint. The production rules eliminate several noisy primitives to create new primitives through the merging process of primitives. After the recognition of weld joint, arc welding is started and the location of weld joints is repeatedly detected using a spring model-based template matching in which the template model is a by-product of the recognition process of weld joint. To show the effectiveness of the proposed approach, a series of experiments - identification and robotic tracking - are conducted for four different types of weld joints.

### I. 서론

용접은 구속접합법으로서 근대 산업의 필수적인 생산기술이지만 용접공정은 작업환경이 열악할 뿐만 아니라 품질의 균일성이 많은 차이를 보이는 민감한 작업이다. 따라서 로봇을 도입하여 이러한 문제를 극복하고자하는 노력이 많이 시도되고 있다. 그런데 일반적인 teach and play방식의 로봇시스템에서의 용접은 초기장착오차, 용접물의 가공오차, 또는 용접과정중의 열변형등으로 인하여 용접토치와 용접선의 불일치를 유발한다. 이러한 용접 토치와 용접선의 불일치를 해결하기 위하여 지금까지 아크센서[1], 적외선 센서[2], 시각센서[3]-[6] 등과 같은 센서들을 이용하여 용접선을 on-line으로 검출하여 용접토치를 제어하는 시스템이 많이 개발 되었다. 이 중에서 시각센서는 CCD카메라로부터 입력된 화상 정보의 영상처리를 통하여 용접선의 위치 간극 크기의 측정을 가능하게 한다. 그러나 시각센서를 이용하면 용접질을 제어하는데 필요한 많은 정보를 얻을 수 있지만 영상처리를 하는데 있어서는 아크광이나 스패터등의 노이즈와 다양한 표면 조건, 다양한 조인트 형상, 실시간 영상처리 요구등과 같은 많은 문제점이 따르게 된다.

따라서 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위하여 수치적인 사전(prior) 정보없이 다양한 변화를 가지는 패턴을 인식하는데 많이 이용되는 구문론적 접근방법(syntactic approach method)[7][8]을 도입하여 다양한 용접조인트에 대하여 조인트 형상을 자동인식할 수 있게하고 노이즈 환경에 강건하게 대응할 수 있는 조인트 위치검출을 위한 실시간 영상처리방법을 제안하여 신뢰성 있는 용접선 추적을 하고자 한다.[4] 여기에서 시각센싱헤드는 Fig. 1과 같이 CCD카메라와 구조화된 광원을 투사하는 다이오드 레이저로 구성되어 있다.

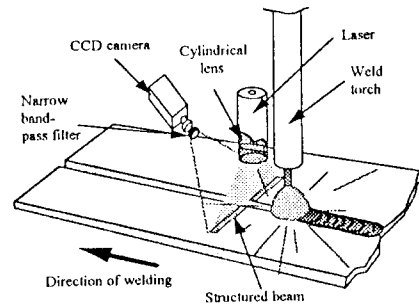


Fig. 1 시각센싱헤드의 구성도

이어지는 II장, III장, IV장에서는 구문론적 영상처리 기법을 이용한 영상처리 알고리즘에 대한 설명과 카메라 교정 및 용접선 추적을 위한 알고리즘에 대한 설명을 한다. V장에는 앞절의 알고리즘 각각의 실험에 대한 전체적인 설명과 실험결과에 대한 결과 및 그에 대하여 검토를 한다. 마지막으로 VI장에서는 본 연구에 대한 결론에 대하여 서술한다.

## II. 구문론적(Syntactic) 영상처리 기법

영상처리기법은 용접개시전에 용접조인트의 형상을 인식하여 기하학적 모델을 만드는 모델링루틴과 앞에서 만들어진 모델을 이용하여 용접조인트의 위치를 탐색하는 모델정합루틴으로 나누어진다. 아래 Fig.2에 조인트 위치 검출 알고리즘에 대한 전체 흐름도의 그림이 있다.

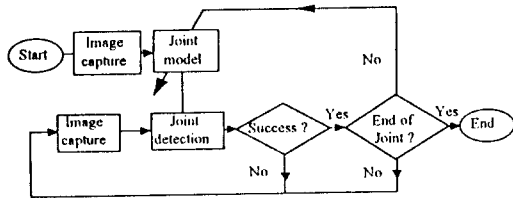


Fig. 2 조인트 위치검출 알고리즘 흐름도

### 1. 조인트의 인식 및 모델의 구축

조인트의 인식 및 조인트의 기하학적 모델구축은 용접이 개시되기 전이므로 노이즈가 많이 포함되지 않은 영상에서 수행된다.

#### 1.1 영역분할(Image segmentation)

먼저, 용접 개시전의 영상에서 임의의 종축에 대하여 명도를 1차미분하여 그 미분값이 최대 및 최소값을 가지는 종축좌표값들의 차이를 이용하여 레이저티의 폭( $T_L$ )을 구한후 레이저티의 두께를 이용하여 경계치값( $V_m$ )을 구하며, 이 경계치값을 이용하여 레이저티 영역과 배경영역을 이치화하는 방법을 채용하였다.

#### 1.2 세선화(Thinning) 및 라인 세그먼트 추출

본 루틴에서는 run-length coding방법[9]을 이용하여 이치화된 레이저티영역에서 중심점을 찾은 후 픽셀 단위로 흩어진 레이저티의 중심점들을 8-connectivity chain coding방법으로 그룹핑 한다. 특징점들의 그룹핑이 완료되면 각 그룹별로 iterative polygon approximation 기법을 수행하여 라인 세그먼트들을 추출 한다.[7]

### 1.3 구문분석법에 대한 조인트의 형태 인식

#### 패턴 표현

아래에 있는 Table 1에서는 라인 프리미티브들과 결합부의 프리미티브들을 보여 준다. 라인프리미티브는 라인세그먼트의 길이에 따라 분류하고 결합부 프리미티브는 이웃한 두 라인세그먼트의 기하학적 배치관계에 따라 분류되어진다.

Table 1. 라인 프리미티브와 결합부 프리미티브

	LABEL	REPRESENTATION
Line Primitives	$n$	
	$l$	
Junction Primitives	$a1$	
	$a2$	
	$a3$	
	$b1$	
	$b2$	
	$b3$	
	$c1$	
	$c2$	
	$c3$	
	$d1$	
	$d2$	
	$d3$	
	$e1$	
	$e2$	
	$e3$	
$f1$		
$f2$		
$f3$		

라인 프리미티브의 한 요소를  $\langle P_L \rangle$ 이라고 하고 결합부 프리미티브의 한 요소를  $\langle P_J \rangle$ 라고 할때 조인트 영상의 패턴은 다음과 같이 1차원문장으로 초기문장을 표현한다.

$$\text{패턴} = \{ \langle P_{l_1} \rangle \langle P_{l_2} \rangle \langle P_{l_3} \rangle \dots \langle P_{l_{m-1}} \rangle \langle P_{j_{m-1}} \rangle \langle P_{l_m} \rangle \}$$

여기서,  $m$ 은 전체 라인 세그먼트의 갯수이다.

#### 생성규칙(Production Rule)

초기문장에는 노이즈가 포함되어 있을 수 있으므로 패턴의 특성에 맞는 생성규칙을 구축하여 이 규칙에 따라 문장을 재표현하여 최종문장을 만든다. Table2는 본 연구에서 사용된 생성규칙을 보여준다.

#### 구문 분석(Syntax Analysis)

용접조인트 형상의 종류에 따라 reference pattern language를 미리 작성해 두고 이 기준언어중의 하나와 입력패턴의 최종문장이 일치 하는가를 분석하여 용접 조인트의 형태를 판별한다.

Table 2. Production Rules

1	$\langle gpp \rangle \rightarrow$	$\langle b^* \rangle, \langle c^* \rangle, \langle d^* \rangle, \langle e^* \rangle, \langle f^* \rangle$
2	$\langle n \text{ 'rmvne' } \rangle \rightarrow$	$\langle l \rangle \langle gpp \rangle \langle n \rangle$ (if followed by 'l')
3		$\langle n \rangle \langle gpp \rangle \langle l \rangle$
4	$\langle angle \rangle \rightarrow$	$\langle a2 \rangle, \langle a3 \rangle$
5	$\langle contact \rangle \rightarrow$	$\langle angle \rangle, \langle al \rangle$
6	$\langle line \rangle \rightarrow$	$\langle n \rangle \langle contact \rangle \langle n \rangle$
7		$\langle n \rangle \langle contact \rangle \langle l \rangle$
8		$\langle l \rangle \langle al \rangle \langle n \rangle$
9		$\langle l \rangle \langle al \rangle \langle l \rangle$
10		$\langle l \rangle \langle angle \rangle \langle n \rangle$ (if not followed by 'al' < l >')

Table 3. Reference Pattern Language

Type	Reference Pattern Language	Diagram
Butt	$\langle l \rangle \langle al \rangle \langle l \rangle \langle cl \rangle \langle l \rangle$ $\langle l \rangle \langle bl \rangle \langle l \rangle$	
Vec	$\langle l \rangle \langle a3 \rangle \langle l \rangle \langle a2 \rangle \langle l \rangle \langle a3 \rangle \langle l \rangle$	
Fillet	$\langle l \rangle \langle a2 \rangle \langle l \rangle$	
Lap	$\langle l \rangle \langle a3 \rangle \langle l \rangle \langle a2 \rangle \langle l \rangle$ $\langle l \rangle \langle a2 \rangle \langle l \rangle \langle a3 \rangle \langle l \rangle$	

### 1.4 조인트 모델의 구축

이후의 용접선의 위치를 찾는 데 이용하기 위하여 최종적으로 표현된 조인트의 형상특징으로부터 조인트의 기준모델을 만든다. 이때 모델 파라메타들은 각 라인의 길이 및 각 라인의 기울기 등으로 구성된다.

$$T = \{(l_1, \theta_1), \dots, (l_m, \theta_m)\} \quad (1)$$

여기서,  $T$ : 조인트 모델 template

$l_j$ : 라인의 길이

$\theta_j$ : 라인의 기울기

$m$ : 라인의 갯수

### 2. 용접조인트 위치탐색

용접개시 이후에는 영상정보에 많은 노이즈가 포함 되어 있으므로 용접조인트를 신뢰성있게 찾을 수 있도록, 라인정보필터링기법을 사용한다. 또한 모델구축 시에 만들어진 조인트의 형상정보를 이용하여 top-down 방식의 모델 매칭 방법을 이용한다.

#### 2.1 레이저미의 탐색(Line detection) 및 세선화

앞서 구한 레이저미두께인  $T_i$ 에 따라 적응적으로 구축한 line detection mask를 사용하여 레이저미를 찾게 된다. 이하 생성규칙 적용까지는 앞의 1절과 일치한다.

#### 2.2 모델 정합(matching)법에 의한 조인트 위치 탐색

용접개시 이후의 화상에서 구한 최종문장은 노이즈를 포함하고 있을 수 있으므로 모델구축때 만들어둔 기준모델의 정보와 현재의 최종문장을 형틀정합 하여서 용접조인트의 위치를 구한다.

형틀 정합을 하는 방법은 모델 형틀을 구성하고 있는 결합부와 동일한 여러개의 결합부를 대상으로 각각의 결합부에서 길이, 각도 및 진직도의 유사도등을 비교하여 비용 $E$ 를 구하고, 이 비용이 최소가 될때의 결합 관계를 이용하여 조인트의 위치를 구한다. Fig.3은 형틀정합에 대한 설명을 나타낸 것이다.

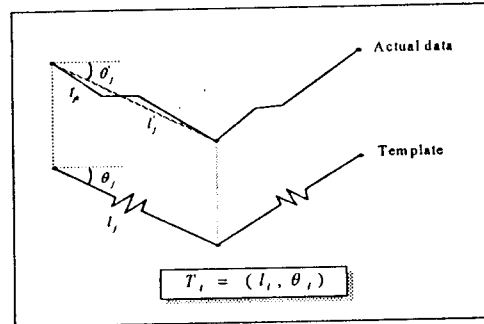


Fig.3 형틀정합

o Length Similarity :  $L_j = \left( \frac{l_j - l'_j}{l_j} \right)^2 \quad (2)$

o Angle Similarity :  $A_j = \left( \frac{\theta_j - \theta'_j}{90} \right)^2 \quad (3)$

o Straightness Similarity :  $S_j = \left( 1 - \frac{l'_j}{\sum_{k=1}^m l'_k} \right)^2 \quad (4)$

$$M_j = \sqrt{K_l L_j + K_\theta A_j + K_s S_j} \quad (5)$$

$$E = \sum_{j=1}^m M_j \quad (6)$$

여기서,

$i$ : Template에 대응되는 actual data중의 후보 결합부

$l'_j$ : 모델에서  $j$ 번째 형틀의 직선길이

$l'_j$ :  $l_j$ 과 대응되는 후보 라인의 길이

$l'_{jk}$ :  $l_j$ 를 구성하는 라인세그먼트 길이 및 결합부의 간격

$\theta'_j$ : 모델에서  $j$ 번째 형틀의 각도

$\theta'_j$ :  $\theta_j$ 과 대응되는 후보 라인  $l'_j$ 의 기울기

$K_i$ : 길이에 대한 비례상수

$K_\theta$ : 각도에 대한 비례상수  
 $K_s$ : 진직도에 대한 비례상수  
 $n$ :  $t_s^u$ 의 갯수  
 $m$ : 행들의 갯수

### III. 카메라 교정(calibration)

용접선의 2차원 영상좌표값과 용접선의 3차원 절대 좌표값 사이에 존재하는 대응관계를 구한다. 이때 대응관계는 4x3의 변환행렬로 나타낼수 있다. 여기서 영상좌표계와 센서좌표계는 모두 동차(homogeneous) 좌표계의 형태로 표현된다.

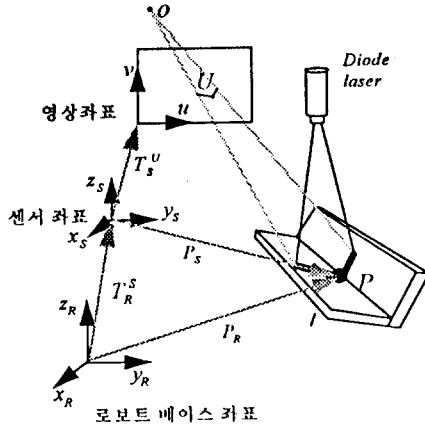


Fig. 4 카메라교정 좌표계

센서좌표계  $F_S$ 에서 임의의 한점  $P$ 를 동차 좌표로 나타내면  $(\omega x_s, \omega y_s, \omega z_s, \omega)$ 가 된다. 이 점에 대응되는 영상평면상의 한점  $U$ 를 영상좌표계  $F_U$ 에서 동차좌표로  $(u, v, 1)$ 과 같이 나타낼 수 있다. 이 때,  $P$ 와  $U$ 의 대응관계를 나타내는 변환행렬  $T_S^U$ 는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$P_s = T_s^u \cdot U \quad (7)$$

또는,

$$\omega \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} & t_{13} \\ t_{21} & t_{22} & t_{23} \\ t_{31} & t_{32} & t_{33} \\ t_{41} & t_{42} & t_{43} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \end{bmatrix} \cdot U \quad (8)$$

이때, 아래와 같은 관계가 성립된다.

$$\begin{aligned} x_s &= T_1 \cdot U / T_4 \cdot U \\ y_s &= T_2 \cdot U / T_4 \cdot U \\ z_s &= T_3 \cdot U / T_4 \cdot U \end{aligned} \quad (9)$$

이식을 다음과 같이 고칠 수 있다.

$$\begin{aligned} T_1 \cdot U - (T_4 \cdot U)x_s &= 0 \\ T_2 \cdot U - (T_4 \cdot U)y_s &= 0 \\ T_3 \cdot U - (T_4 \cdot U)z_s &= 0 \end{aligned} \quad (10)$$

여기에서 수식(8)의 변수  $\omega$ 는 임의로 설정할 수 있으므로  $t_{43}$ 를 1로 설정할 수 있다. 수식(10)을 정리하면 수식(11)과 같은 행렬식으로 나타낼 수 있다.[9]

$$\begin{bmatrix} u^i & v^i & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -u^i x_s^i & -v^i x_s^i \\ 0 & 0 & 0 & u^i & v^i & 1 & 0 & 0 & -u^i y_s^i & -v^i y_s^i \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & u^i & v^i & -u^i z_s^i & -v^i z_s^i \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ u^m & v^m & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -u^m x_s^m & -v^m x_s^m \\ 0 & 0 & 0 & u^m & v^m & 1 & 0 & 0 & -u^m y_s^m & -v^m y_s^m \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & u^m & v^m & -u^m z_s^m & -v^m z_s^m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_{11} \\ t_{12} \\ t_{13} \\ t_{21} \\ t_{22} \\ t_{23} \\ t_{31} \\ t_{32} \\ t_{33} \\ t_{41} \\ t_{42} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_s^1 \\ y_s^1 \\ z_s^1 \\ \vdots \\ x_s^m \\ y_s^m \\ z_s^m \end{bmatrix} \quad (11)$$

이때,  $x_s^j, y_s^j, z_s^j$  와  $u^j, v^j$ 는 각각  $j$ 번째 교정점의 센서좌표계와 이에 대응되는 영상상의 좌표값이고 이 식에서 미지수는 11개이다. 교정 데이터의 갯수가  $n$ 개 일때, 방정식은 모두  $3n$ 개가 존재하므로, 서로 같은 평면상에 존재하지 않는 4점 이상의 교정데이터가 있으면, 해의 여유자유도를 가지게 되어 변환행렬을 구할 수 있다.

### IV. 용접 토치 위치 제어

용접선의  $i$ 번째 위치를  $\vec{P}_i(x(i\Delta T), y(i\Delta T), z(i\Delta T))$  라고 하고, 토치의  $j$ 번째 위치를  $\vec{P}_j(x(j\Delta t), y(j\Delta t), z(j\Delta t))$  라고 한다. 여기에서  $i$ 는 인식된 용접조인트의 위치에 대한 점들의 연속적인 순서를 나타내고  $j$ 는 로봇트가 이동하는 순서를 나타낸다. 그리고  $\Delta T$ 는 영상처리를 하는 샘플링(sampling)시간을 나타내고  $\Delta t$ 는 로봇트에 구동명령을 주는 샘플링시간이다. 토치를  $\vec{P}_j(x(j\Delta t), y(j\Delta t), z(j\Delta t))$ 에서  $\vec{P}_i(x(i\Delta T), y(i\Delta T), z(i\Delta T))$ 로 이동 시키기 위해서는 그 차이만큼의 거리를 샘플링  $\Delta t$ 시간동안 이동시켜야 하는데 용접공정중에는 용접토치의 이동속도  $v$ 가 항상 일정하여야 하므로 샘플링 시간동안 이동할 거리는 항상  $\Delta l$ 으로 일정하다.

$$v = \frac{\Delta l}{\Delta t} = \text{constant} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \vec{E}(x(j\Delta t), y(j\Delta t), z(j\Delta t)) \\ = \vec{P}_i(x(i\Delta T), y(i\Delta T), z(i\Delta T)) - \vec{P}_j(x(j\Delta t), y(j\Delta t), z(j\Delta t)) \end{aligned} \quad (13)$$

여기서  $\vec{E}(x(j\Delta t), y(j\Delta t), z(j\Delta t))$ 는 현재 토치위치와 이동할 위치간의 거리오차 이다. 용접공정중에 토치를 항상 일정한 속도로 이동시켜야 하므로 로봇트의 이동위치를 항상 재생성(reproduction)하여야 한다.

현재의 토치위치에서 이동할 토치위치는 수식(14)와 같다.

$$\begin{aligned} & \bar{P}_i(x((j+1)\Delta t), y((j+1)\Delta t), z((j+1)\Delta t)) \\ &= \bar{P}_i(x(j\Delta t), y(j\Delta t), z(j\Delta t)) + \frac{\bar{E}}{|\bar{E}|} \cdot v \Delta t \end{aligned} \quad (14)$$

## V. 실험

### 1. 실험 장치

본 연구에서 제안한 알고리즘의 성능을 입증하기 위하여 사용한 실험장치는 산업용 6축 수직다관절 로봇(삼성전자, FARA A1-U), NC제이 용접전용 자동용접기(NAS-AUTO 350) 및 IBM PC 486로 구성되어 있다.

### 2. 실험내용

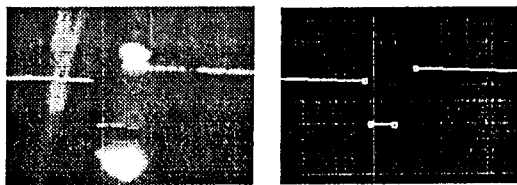
본 실험의 대상용접조인트는 맞대기, 겹치기, 필렛 및 V-그루브 등이었고, 이러한 용접물에 대하여 용접 개시 전에 용접조인트의 형태를 자동인식하여 모델을 구축하고, 용접수행시의 노이즈가 포함된 영상에서 실시간으로 용접조인트의 위치를 검출하여 용접선을 추적하는 실험을 하였다.

### 3. 실험 결과 및 검토

용접조인트 위치를 탐색하면서 그 데이터를 이용하여 용접선 추적을 수행하였다.

#### 3.1 용접조인트 위치 검출 실험

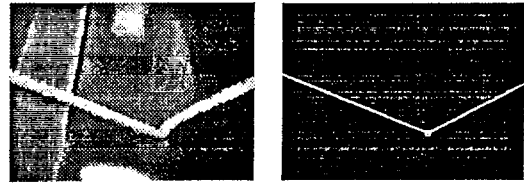
Fig. 4, 5, 6, 7은 각각 용접공정중에 맞대기, 필렛, 겹치기 및 V-그루브등의 용접조인트에 대하여 II장에서 소개한 알고리즘에 따라 수행된 영상처리결과를 보여준다. 즉, 각각의 첫번째 화상(a)는 영상처리되지 않은 원래의 화상이고 두번째 화상(b)는 이미 만들어져 있는 모델에 대하여 형틀 정합이 완료된 영상이다.



(a) raw image (b) identified image

Fig. 4 Butt joint identification

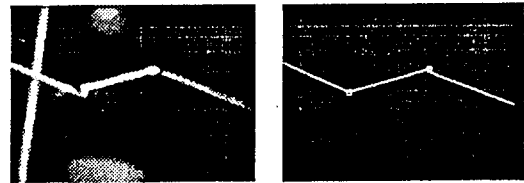
Fig.4(a)는 맞대기용접의 영상처리되지 않은 영상이다. 이 영상에서 구문론적방법으로 용접 조인트의 검출이 완료된 결과를 Fig.4(b)에 나타내었다. 여기에서 "□"는 추출된 각 라인 세그먼트 들의 시점과 종점을 나타낸 것이다. 이 결과를 보면 용접조인트의 위치 검출 알고리즘이 매우 좋은 성능을 가진다는 것을 알 수 있다.



(a) raw image (b) identified image

Fig.5 Fillet joint identification

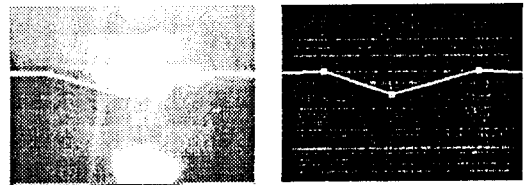
Fig.5(a)는 필렛 용접에 대한 영상으로 Fig.4와 마찬가지로 스펙터, 반점 및 아크광의 영향으로 영상처리가 어려운 영상중의 하나이다. Fig.5(a)를 구문론적 방법에 의하여 Fig.5(b)와 같이 성공적인 용접선 위치 검출을 하였다.



(a) raw image (b) identified image

Fig.6 Lap joint identification

Fig.6(a)는 겹치기 용접에 대한 영상으로 레이저피와 교차한 스펙터와 경면반사 특성에 의하여 오른쪽 부분에서는 희미한 레이저피를 볼 수 있다. 이러한 영상에서도 Fig.6(b)와 같이 본 연구의 알고리즘에 의하여 용접조인트의 위치를 찾을 수 있다.



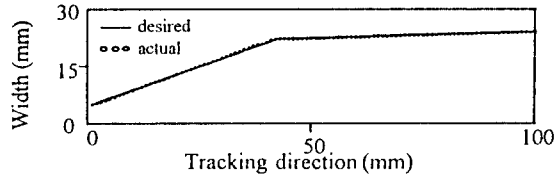
(a) raw image (b) identified image

Fig.7 V-joint identification

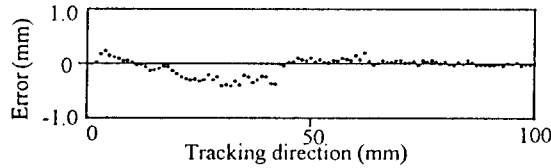
Fig.7(a)는 V-그루브 용접의 영상으로 레이저피와 구분하기 어려운 중심부의 큰 반점과, 아크광에 의하여 전체적으로 매우 밝은 명도를 가진다. 그리고 경면 반사특성에 의하여 레이저피의 명도는 상당히 약하게 되어 육안으로도 구분하기 어려울 정도이다. 이러한 영상에 대한 영상처리는 가장어려운 것 중의 하나이다. 이러한 영상에서도 본 알고리즘에 의하여 Fig.7(b)와 같이 성공적인 용접조인트에 대한 정보를 얻을 수 있다. 이상의 네가지 형태의 용접조인트에 대한 실험 결과 들을 볼때 본 알고리즘이 매우 좋은 성능을 보임을 알 수 있다.

### 3.2 용접선 추적 실험

3차원의 형상을 가지는 용접선을 추적하여 Fig.8(a) 및 Fig.9(a)와 같이 각각 y-x방향 및 y-z방향으로의 위치값들을 서로 비교하였다. 여기서, y는 진행방향이고 z는 수직방향이다. 이렇게 비교한 결과 Fig.8(b), Fig.9(b)와 같이 초기에는 약0.5mm의 큰 오차도 존재하지만 그 이후에는 0.5mm이하의 오차를 가지고 용접선을 추적하는 것을 볼 수 있다.

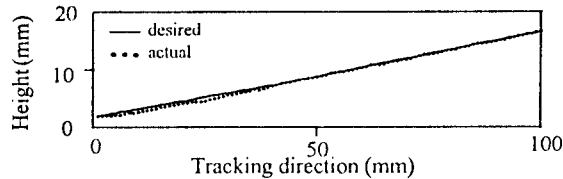


(a) Desired path and actual path(x-direction)

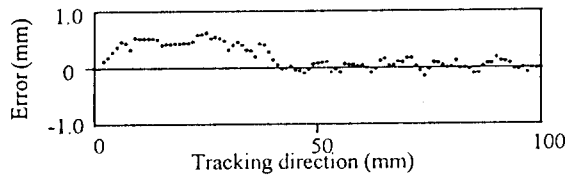


(b) Tracking error(x-direction)

Fig.8 Results of the tracking(x-direction)



(a) Desired path and actual path(z-direction)



(b) Tracking error(z-direction)

Fig.9 Results of the tracking(z-direction)

## VI. 결론

본 연구에서는 시각센서를 이용한 용접선 추적에서, 아크광 및 스패터등의 노이즈와 다양한 표면 조건, 다양한 조인트 형상, 실시간 영상처리 요구등과 같은 어려운 영상처리 조건에 대응할 수 있는 구문론적

영상처리 알고리즘을 제안하여 용접조인트 위치인식 및 용접선추적실험을 하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

첫째, 용접조인트의 형태를 자동인식 하는 알고리즘을 개발하여 노이즈에 강건하게 용접조인트의 형태를 인식 할 수 있었다.

둘째, 구문론적 영상처리기법을 도입하여 아크광 및 스패터 등의 노이즈에 강건하게 용접조인트의 위치를 검출 할 수 있었다.

셋째, 본 연구에서 제안하는 알고리즘으로 용접선 추적에서 요구하는 실시간영상처리를 할 수 있었다.

넷째, 용접선추적실험을 한 결과, 신뢰성 있는 용접선 추적을 하였다.

본 연구는 지금까지 4가지 용접조인트에 대해서만 실험을 하였지만 본 방법을 확장하여 좀더 다양한 형태의 용접조인트에도 적용이 가능하다고 생각한다.

## 참고 문헌

- [1] K. I. Johnson, "Relationship Between Arc Light, Current and Arc Length in TIG Welding", Int. Conf. on Advances in Joining and Cutting Process, Oct.-Nov., pp. 32-41, 1989
- [2] S. Nagarajan, P. Banerjee, W. Chen, and B. A. Chin, "Control of the Welding Process Using Infrared Sensors", IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol. 8, No. 1, pp. 86-92, 1992
- [3] J. E. Agapakis, J. M. Katz, J. M. Friedman, and G. N. Epstein, "Vision-Aided Robotic Welding : An Approach and a Flexible Implementation", The Int. J. of Robotics Research, Vol. 9, No. 5, pp. 17-34, 1990
- [4] Young-Tak Sohn, et al., "A Robust Algorithm for Visual Recognition and Tracking of the Joint in Robotic Arc Welding", '94 Proc. of the 9th KACC, Vol. 2, pp. 1167-1172, 1994
- [5] P. Sicard, and M. D. Levine, "Joint Recognition and Tracking for Robotic Arc Welding", IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. 19, No.4, pp. 714-728, 1989
- [6] D. P. Choi, "A Study on the Weld Seam Tracking and Selection of Welding Parameters in Thin Plate Welding Using Vision Sensor", M.S. thesis, KAIST, 1994
- [7] R. C. Gonzalez, and R. E. Woods, "Digital Image Processing", Addison Wesley, 1992
- [8] D. H. Ballard, and C. M. Brown, "Computer Vision", Prentice Hall, 1985
- [9] H. Shapiro, "Computer and Robot Vision", Addison Wesley, Vol. 1, 1992