

## 레이저빔 수직투사 구조의 시각장치를 이용한 실시간용접선추적 시스템

김진대\* , 신찬배# , 이재원\*\*

### Real-Time Seam Tracking System Using a Visual Device with Vertical Projection of Laser Beam

Jin-Dae Kim\*, Chan-Bai Shin# and Jeh-Won Lee\*\*

#### ABSTRACT

Because of the size and environment in the shipbuilding process, the portable type robot is required for the automatic seam tracking. For this reason, the structure of laser sensor should be considered in the initial design step and the coordinate transformation between welding robot and laser sensor, which is joint finder, must be identified exactly and the real time tracking algorithm based on these consideration could be developed. In this research, laser displacement sensor in which its structure is laser beam's vertical projection, is developed to recognize the location of weld joint. In practical applications, however, images of weld joints are often degraded because of the surface specularly or spatter. To overcome the problem, the constrained joint finding algorithm is proposed. In the approach of coordinate conversion rule for the visual feedback control among welding torch, robot body and laser sensor is applied by the same reference point method. In the real time seam tracking algorithms we propose constrained sampling method which uses look ahead distance. The RLS(Recursive Least Square) filter is applied to obtain the smooth tracking path from the sensitive edge data. From the experimental results, we could see the possibility that the developed laser sensor with proposed processing algorithm and real time seam tracking method can be used as a welding under the shipbuilding condition.

**Key Words** : Laser beam's vertical projection (레이저빔 수직투사), Constrained joint finding (구속적 조인트 인식), Same reference point method (동일기준점 방식), Real time seam tracking (실시간용접선추적), RLS Filter (순환최소자승필터)

#### 1. 서론

최근 조선소 선체 블록의 용접 공정에서는 작업

량이 많고 고소작업 및 실외 환경 등 작업환경이 열악하여 인력수급이 어려워지고 있다. 따라서 조선용 용접선 추적 로봇의 개발이 필수적이다. 일반

접수일: 2007년 2월 12일; 게재승인일: 2007년 8월 9일

\* (주) 유진엠에스 기술연구소

# 교신저자: 울산과학기술대학 디지털기계학부

Email: cbshin@mail.uc.ac.kr Tel. (052) 279-3108

\*\* 영남대학교 기계공학부

로봇용접에서는 작업 대상물의 초기 위치오차, 용접 대상물의 가공 오차 등으로 인하여 용접토치와 용접선의 불일치를 유발한다. 이러한 불일치를 해결하기 위하여 레이저시각 센서<sup>1,2</sup>를 이용하는 등 용접선 자동 추적 로봇에 대한 연구가 다양하게 진행되어 오고 있다.<sup>3-6</sup> 선체 블록의 용접과 같은 거대 용접 라인을 추적하기 위한 시각 센서의 구조와 이를 이용한 효율적 좌표 변환 및 인식 방법, 실시간 용접선 추적 알고리즘에 대한 개발사례는 아직 미비한 실정이다.<sup>7</sup>

조선용 용접로봇은 작업 대상물의 형태와 구조가 다양하며 크기가 거대하므로 자동용접로봇시스템을 용접장소로 이동해가며 작업을 수행하여야 하는 이동(Portable) 타입이 요구된다. 이로 인하여 용접선인식시각센서의 기하 구조 및 로봇과 시각센서간의 좌표값 변환 관계에 대한 고려가 중요하며 이에 기반한 실시간 추적용 알고리즘의 개발이 필수적이다.

따라서 본 논문에서는 레이저 빔을 수직으로 투사하는 방식의 시각장치를 제안하고 이 장치로부터 용접 토치의 위치 보상을 쉽게 해결할 수 있는 방법을 개발코저하며 선행거리 구속적 실시간 추적 알고리즘을 제시하여 선체 블록의 Half V 조인트의 용접선 추적을 수행하는 방법을 연구하고자 한다.

## 2. 용접선 추적용 레이저시각장치의 설계

### 2.1 레이저 빔 수직 투사 구조

레이저빔과 CCD카메라를 이용한 3차원 측정법은 공간상에 평면의 레이저광과 카메라 사이의 광학 기하를 이용하여 측정물체에 따른 단면의 형상에 의한 3차원 정보를 측정하는 기술로 주로 레이저빔을 경사지게 설치하여 사용한다.

본 연구에서 제안하는 레이저빔 수직 투사 구조는 Fig. 1과 같으며 CCD카메라를 경사지게 설치하는 기하 구조로서 용접토치와 일정한 선행 거리(Look ahead distance)  $a$ 를 가진다. 이와 같은 레이저빔 수직 투사 구조는 카메라로 입력되는 영상이 곧 레이저빔 면상에 존재하는 점들로 구성되므로 그림에서와 같이 3차원의 데이터 보정 시  $x$ 방향에 대한 요소를 일정하게 하고  $y, z$ 방향의 단면 정보만으로도 수행가능하게 된다. 또한  $x$ 방향 좌표계만 용접선 추적 토치좌표계 ( $x_T, y_T, z_T$ )와 일치시키면 기구학적 좌표 변환 시 발생하는 미지수들을 줄

일 수 있어 용접선 인식용으로 적당한 방법이 된다.

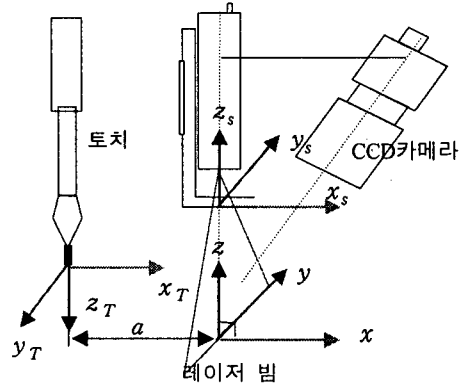


Fig. 1 Perpendicular projection of laser beam

### 2.2 레이저 시각 장치 보정

레이저시각 장치의 보정은 용접 조인트의 단면 프로파일에 해당하는 2차원 영상 좌표값과 레이저 센서 좌표계 ( $x_s, y_s, z_s$ ) 상의 3차원 절대 좌표값 사이에 존재하는 대응관계를 구하는 과정으로  $4 \times 3$ 의 변환 행렬(Transformation matrix)로 나타낼 수 있다. 여기서 영상좌표계와 센서좌표계는 모두 동차 좌표계의 형태로 표현된다.

센서 좌표계 ( $x_s, y_s, z_s$ ) 에서 임의의 한 점  $P$ 를 동차 좌표로 나타내면 ( $w x_s, w y_s, w z_s, w$ )가 된다. 이점에 대응되는 영상 평면상의 한 점  $U$ 를 영상 좌표계에서 동차 좌표로 ( $u, v, 1$ )과 같이 나타낼 수 있다. 이때,  $P$ 와  $U$ 의 대응관계를 나타내는 변환행렬  $A$ 는 다음 식 (1)과 같이 정의할 수 있다.

$$P = A \cdot U \tag{1}$$

$$w \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_1 U \\ M_2 U \\ M_3 U \\ M_4 U \end{bmatrix}$$

이때, 아래와 같은 관계가 성립된다.

$$x_s = \frac{M_1 U}{M_4 U}, y_s = \frac{M_2 U}{M_4 U}, z_s = \frac{M_3 U}{M_4 U} \tag{2}$$

이 식을 다음과 같이 고칠 수 있다.

$$\begin{aligned} M_1 U - (M_4 U)x_s &= 0 \\ M_2 U - (M_4 U)y_s &= 0 \\ M_3 U - (M_4 U)z_s &= 0 \end{aligned} \tag{3}$$

여기에서 식 (1)의 변수  $w$ 는 임의로 설정할 수 있으므로  $a_{43}$ 을 1로 설정하였다. 식 (3)을 정리하면 식 (4)와 같은 행렬식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} u^1 & v^1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -u^1x_s^1 & -v^1x_s^1 \\ 0 & 0 & 0 & u^1 & v^1 & 1 & 0 & 0 & 0 & -u^1y_s^1 & -v^1y_s^1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & u^1 & v^1 & 1 & -u^1z_s^1 & -v^1z_s^1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ u^n & v^n & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -u^nx_s^n & -v^nx_s^n \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{11} \\ a_{12} \\ a_{13} \\ \vdots \\ a_{41} \\ a_{42} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_s^1 \\ y_s^1 \\ z_s^1 \\ \vdots \\ x_s^n \\ y_s^n \\ z_s^n \end{bmatrix}$$

$$KA = S \tag{4}$$

이때  $x_s^j$ 는 일정한 값이고,  $y_s^j, z_s^j$ 와  $u^j, v^j$ 는 각각  $j$ 번째 보정점의 레이저센서좌표계 값과 이에 대응되는 영상상의 좌표값이다. 식 (4)에서 미지수는 11개이므로 4점 이상의 보정점이 있으면, 해의 여유 자유도를 가지게 되어 식 (5)와 같이 변환 행렬을 구할 수 있다.

$$A = (K^T K)^{-1} K^T S \tag{5}$$

본 연구에서는 Fig. 2와 같이 센서 장착 지그상에 보정점 라인을 표시하여 보정을 쉽게 수행할 수 있도록 제작하였다.

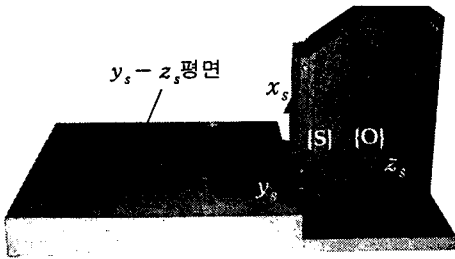


Fig. 2 Perpendicular projection calibration jig

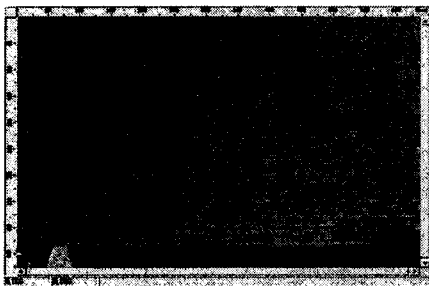


Fig. 3 The Image for calibration points on the jig

다음의 Fig. 3은 위의 장착 지그상에 표시된 60개의 점들을 카메라로 찍은 영상을 나타낸 것으로 본 논문에서는 Fig. 4와 같이 이들 60개의 점에 대응되는 영상 좌표를 마우스로 각각 찾아서 레이저 센서 보정을 수행하였다.

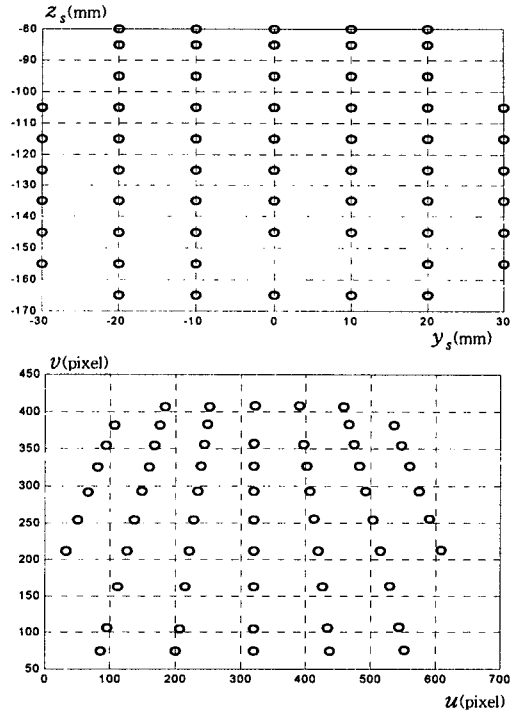


Fig. 4 Perpendicular projection calibration jig

### 2.3 용접선 조인트의 인식 알고리즘

#### 2.3.1 세션화 처리

세션화는 Fig. 5에 나타낸 레이저빔 영상을 전처리하는 단계로 가우시안 분포의 레이저 빔 영상에 대하여 밝기가 가장 밝은 부분을 연결하는 작업이다. 본 논문에서는 레이저광 단면의 빛의 강도를 2차식 곡선 맞춤하여 최대 값을 찾는 방법을 사용하였다. 먼저 Fig. 5에서 레이저 빔 영상은  $v$ 축 방향으로 빛의 강도 함수  $I(v)$ 를 식 (6)과 같이 다차항 함수로 표현할 수 있다.

$$I(v) = \sum_{i=0}^n b_i v_i^i \tag{6}$$

여기서 계수  $b_i (i=0, 1, \dots, n)$ 를 구하기 위해서는 최소한  $n+1$ 화소의 밝기 값이 필요하다.

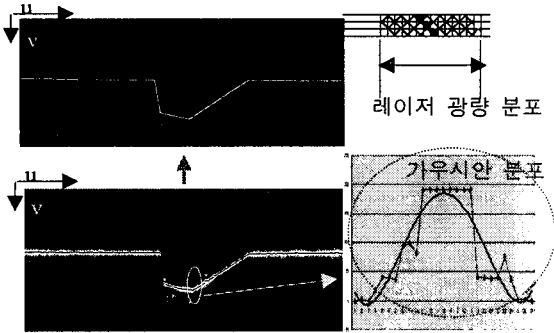


Fig. 5 Laser intensity and thinning process

레이저 광의 영상만을 고려하기 위하여 각 열에서 가장 빛의 세기가 큰 화소  $v_{max}$  를 중심으로 상하로  $m$  화소에서의 강도를 고려하여 밝기 분포곡선의 계수를 구한다. 만일 고려되는 화소의 수가  $2m+1$ 개 일 경우 식 (7)로 적을 수 있다.

$$I = TB \quad (7)$$

여기서,

$$I = \begin{bmatrix} I_{v_{max-m}} \\ I_{v_{max-m+1}} \\ \vdots \\ I_{v_{max+m-1}} \\ I_{v_{max+m}} \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ \vdots \\ b_n \end{bmatrix}$$

$$T = \begin{bmatrix} 1 & (v_{max-m}) & (v_{max-m})^2 & \dots & (v_{max-m})^n \\ 1 & (v_{max-m+1}) & (v_{max-m+1})^2 & \dots & (v_{max-m+1})^n \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & (v_{max+m}) & (v_{max+m})^2 & \dots & (v_{max+m})^n \end{bmatrix}$$

식 (7)에 최소 자승법을 적용하면 구하는 다차항 계수는 식 (8)과 같이 구할 수 있다.

$$B = [(T^T T)^{-1} T^T I] \quad (8)$$

이 계수행렬을 구한 후 식 (6)에 대입하여 뉴턴랩슨법을 이용하여 최대값의 위치를 구함으로써 세선화를 수행하였다.

### 2.3.2 구속적 직선 찾기 알고리즘

허프 변환은 직각 좌표계  $(x, y)$  상의 선 데이터를 극좌표  $(\rho, \theta)$  로 변환하여 처리, 특정 정보를 추출하고 역 변환하여 직선을 찾아내는 방법으로 Fig. 6 과 같이 아크광이나 스패터등에 의한 노이즈 성분이 많은 영상에서 강인하게 직선을 찾을 수 있다.

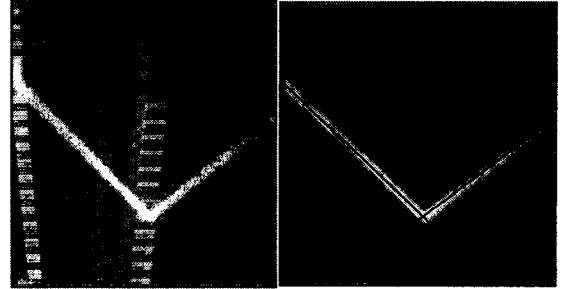


Fig. 6 Line detection under spatter environment

본 연구에서 사용된 Half V 용접 조인트에 대한 레이저 빔 영상은 여러개의 직선 형태 영상을 형성하므로 식 (9)와 같은 각도 구속 허프 변환을 적용하였다.

$$y = ax + b$$

$$\rho = x \cos \theta + y \sin \theta \quad (9)$$

여기서,  $\theta_{lower} < \theta < \theta_{upper}$

$\theta_{lower}$  와  $\theta_{upper}$  는 검사 대상물의 형상에 의해 결정되는 값으로 구속 조건으로 사용가능하며 Half V 에지와 같은 여러 직선 형태의 물체에서 두 직선,  $(\rho_1, \theta_1), (\rho_2, \theta_2)$  에 대한 교점은 식 (10)으로 구할 수 있다.

$$x_i = \frac{-\rho_1 \sqrt{(1/\tan \theta_1)^2 + 1} + \rho_2 \sqrt{(1/\tan \theta_2)^2 + 1}}{-(1/\tan \theta_1) - (1/\tan \theta_2)}$$

$$y_i = \frac{-\rho_1 \sqrt{(1/\tan \theta_1)^2 + 1} (-1/\tan \theta_2)}{-\rho_2 \sqrt{(1/\tan \theta_2)^2 + 1} (1/\tan \theta_2)} \quad (10)$$

### 3. 용접선 추적 로봇

본 연구에서는 Fig. 7에 나타난 조선소 선체 블록 용접용 이동타입의 로봇을 사용하였다.

용접선을 따라 이동하기 위한 로봇 기구부 본체와 실제 용접이 수행되는 토치부, 시각 피드백으로부터 작업 경로를 교정하기 위한 레이저센서부로 구성된다. 로봇 본체는 X-Y-Z축 병진 기구부와 용접각도 제어를 위한 회전 기구부를 본체의 말단에 구성하였다. 여기에서 {R}은 로봇 베이스 좌표계, {B}는 XYZ 병진 부분의 끝단 좌표계, {T}는 토치 좌표계, {S}는 레이저 센서 좌표계를 각각 나타낸다. {S}좌표계와 {T}좌표계 사이에는  $x$ 축을 중심으로만  $180^\circ$  회전시켜  $x_s$  축과  $x_T$  축 평행하게

설치하였고 {R}, {T}는 각 좌표축 사이의 평행을 유지하도록 설계하였다.

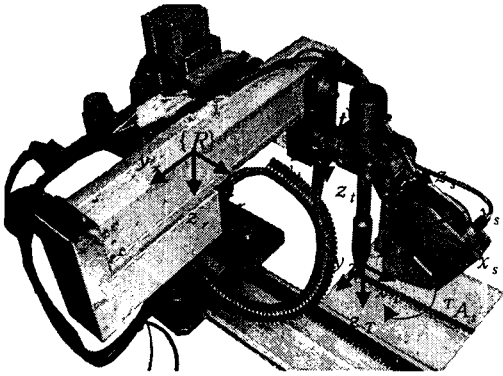


Fig. 7 Seam tracking robot system configuration

### 3.1 센서 TCP 보정 알고리즘

아래의 Fig. 8은 토치TCP와 센서 TCP를 표현하는데 {S}좌표계를 기준으로 얻어진 용접 조인트 정보는 토치좌표계에서 센서좌표계로의 변환,  ${}^T A_s$ 가 정확히 정의되어야만 로봇 베이스 좌표계로 바꿀 수 있으며 로봇 제어기에서 모션 명령을 내릴 수 있게 된다.

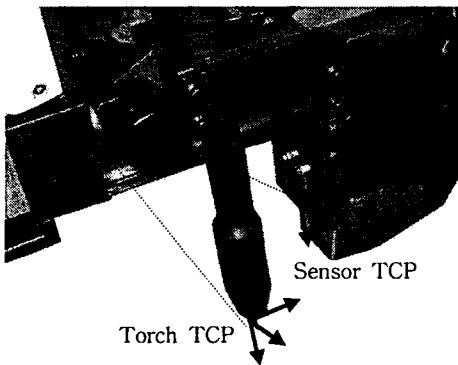


Fig. 8 Torch TCP and sensor TCP

즉, 로봇의 토치 앞단에  $x$ 축을 중심으로 180도 회전 장착된 {S}좌표계에서 {T}좌표계로의 병진 인자를 구하여야 한다. 본 연구에서는 Fig. 9와 같이 용접 조인트 상에 동일 모서리점을 토치와 센서로부터 각각 인식하여 병진인자를 구하는 방법을 연구하였다.

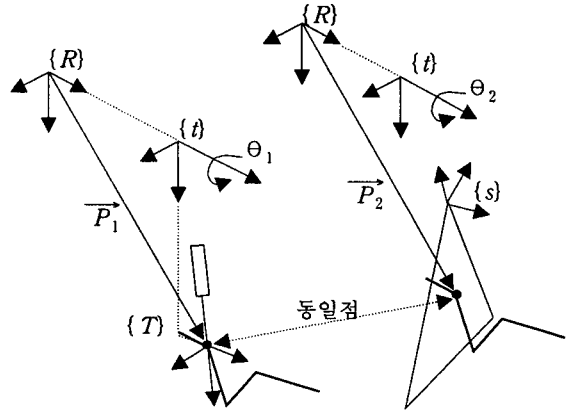


Fig. 9 Calibration method with same reference point

즉, 동일 기준점에 대하여 용접토치로 측정된 로봇 베이스에 대한 좌표 값과 레이저센서로 측정하여 베이스로의 재구성한 좌표 값이 동일하여야 하며 이를 변환 루프 방정식으로 표현하면 Fig. 9의 벡터  $\vec{P}_1 = \vec{P}_2$  와 같다. Fig. 9에서  $\vec{P}_1$  즉, 토치로 측정된 기준점 벡터는 다음의 식으로 표현된다.

$$\vec{P}_1 = {}^R A_t \cdot {}^T A_T \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x + Tox \\ ToyC\theta_1 - Toz \cdot S\theta_1 + y \\ ToyS\theta_1 + Toz \cdot C\theta_1 + z \\ 1 \end{pmatrix} \quad (11)$$

여기서,  $\theta_1$ 은 용접토치로 측정시의 토치 회전각,  $(x, y, z)$ 는 {t}좌표계의 위치,  $(Tox, Toy, Toz)$ 는 토치TCP값을 나타낸다. 다음으로 센서로부터 측정되는 기준점에 대한  $\vec{P}_2$ 는

$$\vec{P}_2 = {}^R A_t \cdot {}^T A_T \cdot {}^S A_s \cdot \begin{pmatrix} Sx \\ Sy \\ Sz \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a + Tbx + x' \\ C\theta_2 \cdot \alpha 1 - S\theta_2 \cdot \alpha 2 + Tby \cdot C\theta_2 - Tbz \cdot S\theta_2 + y' \\ C\theta_2 \cdot \alpha 1 + C\theta_2 \cdot \alpha 2 + Tby \cdot S\theta_2 + Tbz \cdot C\theta_2 + z' \\ 1 \end{pmatrix} \quad (12)$$

여기에서,  $\alpha 1$ 은  $(-Sy + b)$ 이고,  $\alpha 2$ 는  $(-Sz + c)$ 이며,  $\theta_2$ 는 레이저측정시의 센서 회전각,  $(x', y', z')$ 는 레이저측정시의 {t}좌표계의 위치,  $(Sx, Sy, Sz)$ 는 레이저 센서로부터 측정된 기준점 데이터를 의미한다. 구하고자하는 병진 인자는 언

급한 바와 같이 동일 기준점에 대해서는  $\vec{P}_1 = \vec{P}_2$  가 성립하여야 하므로 상관관계식으로부터 식 (13) 과 같이 구할 수 있다.

$$a = x - x' \quad (13)$$

$$\begin{pmatrix} b \\ c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C\theta_2 - S\theta_2 \\ S\theta_2 & C\theta_2 \end{pmatrix}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} Toy(\alpha_3) - Tbz(\alpha_4) + (\alpha_5) + Sy \cdot C\theta_2 - Sz \cdot S\theta_2 \\ Toy(\alpha_4) + Tbz(\alpha_3) + (\alpha_6) + Sy \cdot S\theta_2 + Sz \cdot C\theta_2 \end{pmatrix}$$

여기에서,  $\alpha_3$ 는  $(C\theta_1 - C\theta_2)$ 이고,  $\alpha_4$ 는  $(S\theta_1 - S\theta_2)$ 이며,  $\alpha_5$ 는  $(y - y')$ ,  $\alpha_6$ 는  $(z - z')$ 으로, x축 병진인자  $a$ 는 선행거리로 사용되며  $b, c$ 는 각각 y, z축 병진 인자가 된다.

### 3.2 용접토치의 피드백 경로 계획

로봇 조인트 트래킹을 위해서는 현재의 용접토치 위치를 시각정보로부터 계산된 용접조인트의 위치와 방향으로 움직이기 위한 좌표계산과정이 필요하다. 즉, 선행 거리를 가지는 조인트 추적용 로봇에서는 피드백 된 레이저시각정보로부터 다음 위치로 움직일 로봇 좌표값을 계산하여야 한다. 이를 위한 좌표변환 과정은 식 (14)로 된다.

$$\begin{aligned} {}^R P &= {}^R A_5 \cdot {}^S P \\ &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & Stx + Px_1 \\ 0 & -c\theta_1 & s\theta_1 & Sty c\theta_1 - Stz s\theta_1 + Py_1 \\ 0 & -s\theta_1 & -c\theta_1 & Sty s\theta_1 + Stz c\theta_1 + Pz_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Sx \\ Sy \\ Sz \\ 1 \end{pmatrix} \quad (14) \\ &= \begin{pmatrix} Sx + Stx + Px_1 \\ Sy(-c\theta_1) + Sz(s\theta_1) + Sty(c\theta_1) - Stz(s\theta_1) + Py_1 \\ Sy(-s\theta_1) + Sz(-c\theta_1) + Sty(s\theta_1) + Stz(c\theta_1) + Pz_1 \\ 1 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

여기에서,  $\theta_1$ 은 측정시의 토치/센서 회전각을 나타내며  $(Stx, Sty, Stz)$ 는 센서 TCP를,  $(Sx, Sy, Sz)$ 는 레이저센서 좌표계{S}상에서 측정한 측정값을,  $(Px_1, Py_1, Pz_1)$ 는 측정시의 로봇 좌표값을 각각 나타낸다. 식 (14)에서  ${}^S P$ 는 레이저 센서 좌표계에서 읽은 물체좌표계상의 위치 값을 의미하여  ${}^R P$ 는 이를 로봇 베이스 좌표계상의 값으로 표현한 것이다. 이는 다시 용접선 추적에서는 토치 좌표계의 원점이 접근하여야 하는 값이 되는데, 이때는 새로운 토치 벡터(Desired Vector)에 의하여 구현되어야 한다.

특히, 그밖의  $\{t\}$ 좌표계 원점의 위치가 주어질 새로운  $\theta_2$ (토치접근각도)로부터 결정되어야 하며 이를 식으로 표현하면,

$$\begin{aligned} \text{Desired pos} &= {}^R A_1 \cdot {}^A T \cdot (0 \ 0 \ 0 \ 1)^T \\ &= \begin{pmatrix} Tox + Px_2 \\ Toy(c\theta_2) - Toz(s\theta_2) + Py_2 \\ Toy(s\theta_2) + Toz(c\theta_2) + Pz_2 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (15) \end{aligned}$$

따라서 레이저 센서로부터 피드백된 데이터로 원하는 토치 각도로 로봇을 제어하는 식 (16)으로 정리된다.

$$\begin{aligned} Px_2 &= Sx + Stx + Px_1 - Tbx \\ Py_2 &= Sy(-C\theta_1) + Sz(S\theta_1) + Sty(C\theta_1) \\ &\quad - Stz(S\theta_1) + Py_1 - Toy(C\theta_2) + Tbz(S\theta_2) \\ Pz_2 &= Sy(-S\theta_1) + Sz(-C\theta_1) + Sty(S\theta_1) \\ &\quad - Stz(C\theta_1) + Pz_1 - Toy(S\theta_2) - Tbz(C\theta_2) \end{aligned} \quad (16)$$

여기에서  $\theta_2$ 는 원하는 토치 회전각도를 나타내며,  $(Tox, Toy, Toz)$ 는 토치TCP를,  $(Px_2, Py_2, Pz_2)$ 는 새로운 로봇 경로값을 각각 나타낸다.

### 3.3 실시간 용접선 추적 알고리즘

본 연구에서 센서 TCP보정 과정으로 구한 x축 방향의 병진량, 즉, 선행거리가  $a=68.715mm$ 로 Fig. 10과 같다.

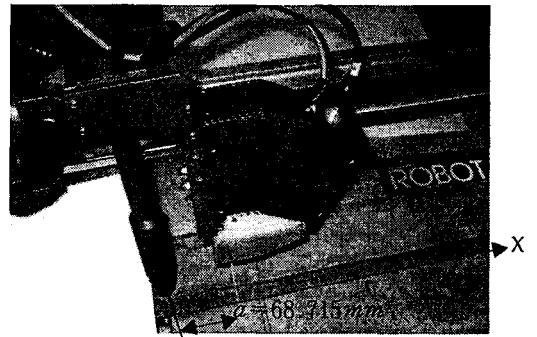


Fig. 10 Tracking robot with look ahead distance

선행거리를 가지는 시스템에 있어서 어떻게 선행 거리를 분할하여 끊김 현상 없이 추적을 실시하는가 하는 것이 실시간 용접선 추적 알고리즘의 구현에 있어서 가장 중요한 부분이다.<sup>7</sup> 본 연구에서는 Fig. 11과 같은 순환버퍼 및 모션 업그레이드 알고리즘을 개발하였다.

즉, 28개의 모션 제어기 내부의 위치 메모리를 이용하여 순차적으로 재 반복, 끊김현상 없이 수행하는 알고리즘으로 모션동작과 데이터 피드백

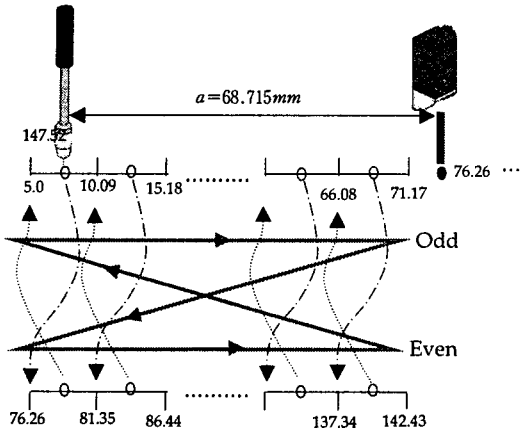


Fig. 11 Real time seam tracking algorithm

(Feedback) 루틴을 서로 다른 작업 쓰레드(Thread)에서 계속 실행하고 동작 타이밍은 용접토치의 이송속도와 레이저센서의 선행거리 구속으로 일치시키는 방법으로 로봇 X방향 초기 경로 생성은 식 (17)과 같이 적을 수 있다.

$${}^{(init)}x_r = ASP + \frac{na}{n-1} * k + (i * \frac{2a}{n-1}) \quad (17)$$

여기에서 n은 모션위치 메모리 할당 개수를 의미하며 ASP(Arc Start Point)는 용접로봇의 시작점 좌표값, i=0~13을 나타내고, k는 14지점의 모션이 끝날 때 마다 1씩 순차적으로 증가하는 값을 나타낸다. Fig. 11의 예시에서와 같이 ASP, 5mm에서 71.17mm까지 총 14지점의 경로를 초기 생성한다. 각 로봇 모션 50% 완료된 시점에서 용접로봇 제어기는 현재의 로봇 위치값을 레이저센서 쓰레드에 전송하면서 현재 레이저 센서의 측정값을 요구한다. 레이저센서 쓰레드에서는 현재의 로봇 위치와 로봇 기구학, 보정 파라미터들로부터 측정된 용접조인트의 위치값을 로봇 베이스 좌표계 중심으로 변환한 후, 선행거리에 맞추어 짝수번(Even) 경로 메모리에 연속적으로 저장한다.

71.17mm에 추적로봇이 도착하면 다음경로는 자동적으로 짝수번 경로로 변경되어 76.26mm에 해당하는 경로메모리를 이용하여 이어진다. 마찬가지로 그림의 위쪽에 해당하는 홀수번 메모리부가 연속적으로 업데이트 되며, 137.34mm이후에는 147.52mm지점으로 로봇 모션이 연속적으로 이어지는 방법이다. 따라서 로봇 모션은 정지 되지 않음

면서 제어기는 일정한 샘플링 간격마다 현재의 로봇 위치를 계속해서 레이저센서 쓰레드에 보내어 연속적으로 용접 조인트 위치 데이터를 피드백 업데이트 할 수 있게 된다.

### 3.4 RLS필터에 의한 민감도 제어

본 연구의 조선용 Half V 블록의 경우 Fig. 12에 나타낸 바와 같이 실시간 추적구간에서의 용접 조인트의 궤적은 일차 직선이다. 하지만 실제 레이저센서로부터 피드백되는 Y,Z 방향 데이터 특징점 (Feature Point)들은 용접 모재의 반사도 및 표면 가공도에 따라 0.07~0.1mm 정도의 편차를 가진다.

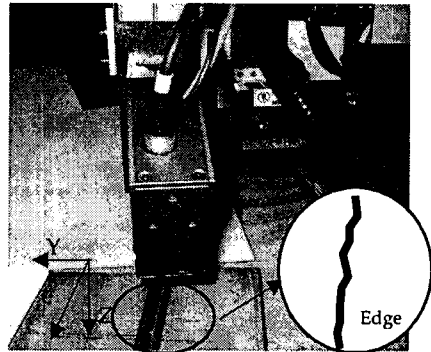


Fig. 12 Edge sensitivity in the joint

이와 같이 작업 대상물의 가공 오차를 그대로 피드백하여 실시간 추적을 수행할 경우 로봇 모션이 민감하게 반응하여 용접 토치의 진동을 유발시킬 수 있다. 이에 대하여 단순히 직선 피팅을 적용할 경우 용접이 진행될수록 데이터량이 증가하고 연산 처리 시간이 길어져 실시간 용접선 추적이 불가능해진다. 이와 같은 문제점을 극복하기 위해서 다음의 순환최소자승(RLS: Recursive least square) 필터를 적용하였다. k개의 방정식을 이용한 RLS 필터의 결과는 식 (18)와 같다.

$$\begin{aligned} \hat{x}(k) &= [A^T(k)A(k)]^{-1}A^T(k)b(k) \\ \hat{x}(k+1) &= \hat{x}(k) + g(k+1)[b_{k+1} - a^T(k+1)\hat{x}(k)] \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \text{여기에서, } g(k+1) &= P(k)a(k+1)\delta^{-1}(k+1) \\ \delta(k+1) &= 1 + a^T(k+1)P(k)a(k+1) \\ P(k) &= [A^T(k)A(k)]^{-1} \\ P(k+1) &= [I - g(k+1)a^T(k+1)]P(k) \end{aligned}$$

본 연구에서는 초기에 10mm간격으로 5번의 용접선 초기 위치 인식을 수행하였고 이들 측정 데이터로부터 초기 조인트 위치인식구간을 총 14점의 모션 궤적을 우선적으로 xy, xz방향 직선적합으로 생성하였다. 앞의 초기 조인트 인식구간에서 우선적으로 구한 최초  $F(k) = [A^T(k)A(k)]^{-1}$ 를 먼저 정의하였고 실제 실시간추적 구간에서 새로운 데이터가 피드백 될 때마다  $g(k+1)$ ,  $\delta(k+1)$ ,  $F(k)$ 를 업데이트 하면서 직선 파라미터를 변경하여 샘플링시간에 지장이 없이 모션 민감도를 조정하였다.

#### 4. 실험 및 검토

##### 4.1 실험 장치 및 조인트 형상

본 연구에서 개발 사용한 레이저 수직 투사 방식의 시각센서 사양은 Table 1에 나타내었다. 카메라는 Sony의 HR50을 사용하였고 프레임 그래버는 메트로스사의 Meteor2-MC/4, 레이저 빔은 Class IIIb, Wave length: 660nm, Power:35mW 고출력레이저를 이용하였다.

Table 1 Developed sensor specification

Stand off distance	Field of depth	resolution
200 mm	100 mm	±0.05 mm



Fig. 13 Seam track test about half V groove

X-Y-Z-T 4축 용접선추적로봇기구의 실시간 제어를 위한 제어기 모델은 Fig. 13의 SRC2 4축 모션 제어기로 PTP, 직선 및 원호 보간, RS-232C, Ethernet 통신 기능을 가지며 외부 인터페이스용 확장 메모리를 장착하고 있다. 이 확장 메모리를 통하여 레이저센서 피드백 데이터와 통신으로 연결

하였다. 검사 및 인식 대상물은 Fig. 14와 같은 조선용 블록 용접에 사용되는 Half V 그루브를 사용하였다.

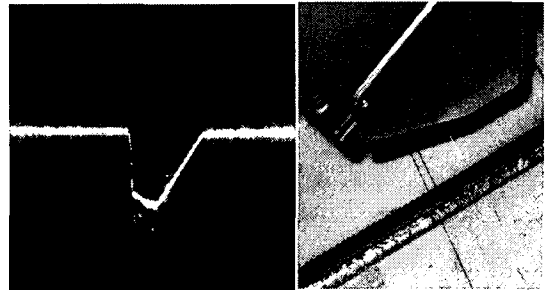


Fig. 14 Tracking joint type : half V groove

##### 4.2 용접선 인식 알고리즘 시험

먼저 Half V 용접 조인트 인식에 의한 각도 및 교점 인식을 위한 실험에서는 Fig. 15에서 보듯이 직선 성분이 4개이므로 각도 구속을 175° 에서 180°, 130° 에서 150°, 10° 에서 20°, 80° 에서 90° 로 설정하여 수행을 하였다.

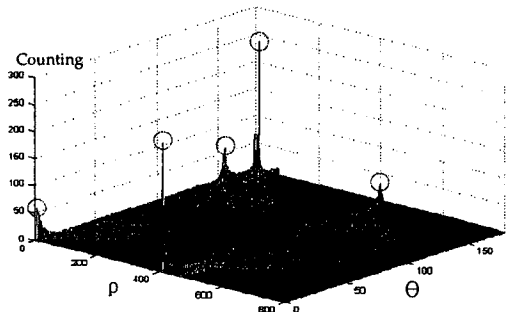


Fig. 15 The result of HT for half V groove

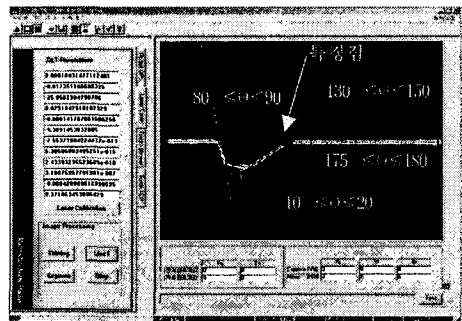


Fig. 16 Line and feature edge recognition result



위의 Fig. 15는 허프 변환 결과를 보이며 그림에서 표시한 O 부분이 찾아내고자 하는 직선성분임을 의미한다. Fig. 16은 전체 Half V 그루브에서 직선들을 찾아내어 인식한 결과를 나타낸다. 본 연구에서는 Half V 그루브 용접선 추적 범위내의 위치 변화를 수용할 수 있는 범위내에서 각도 구속 허프 변환을 적용하였다. 기존의 2차원 영상 전 영역 (640\*480\*180)에 대하여 수행하던 작업을 (640\*49) 회로 줄임으로써 실시간추적을 위한 빠른 처리가 가능하였다.

4.3 실시간 용접선 추적 시험

본 연구의 실시간 용접선 추적 실험에서는 Fig. 17과 같이 추적점들을 x축 진행방향과 4.5도 경사 지게, y축에 대하여 1.5도 경사를 주어 설치한 후 실제의 용접은 수행하지 않고 실시간 추적작업을 수행하였다.

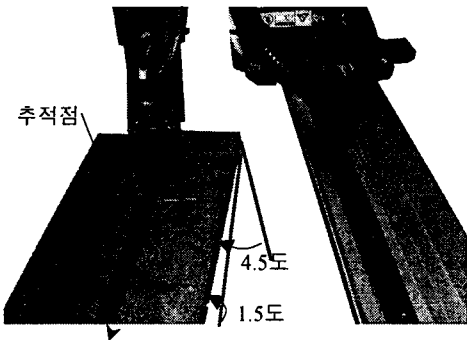
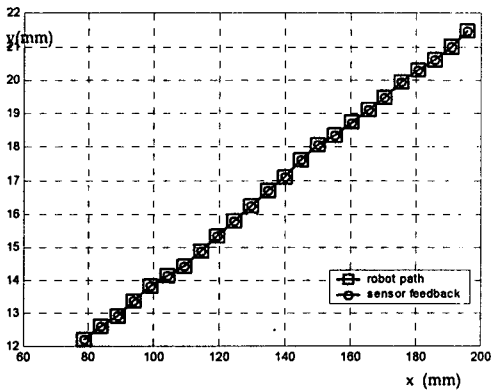


Fig. 17 experiment setup for real time tracking



(a) xy plane tracking result

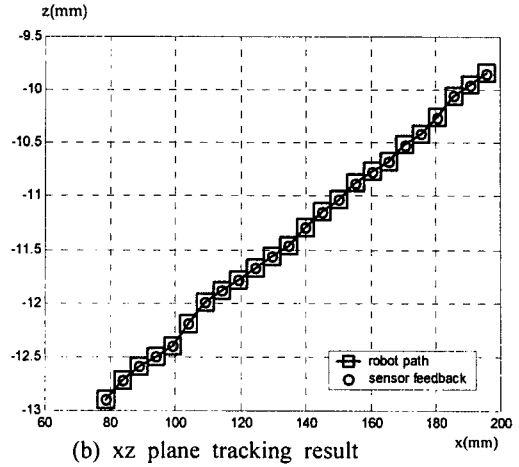


Fig. 18 Experiment result for real time tracking

Fig. 18의 (a)는 xy평면에 대한 조인트 추적결과를, (b)는 xz평면에서의 조인트 추적 결과를 각각 나타낸 것으로 24번의 센서 피드백 경로와 추적을 실시한 로봇 경로를 같이 표시한 그래프이다.

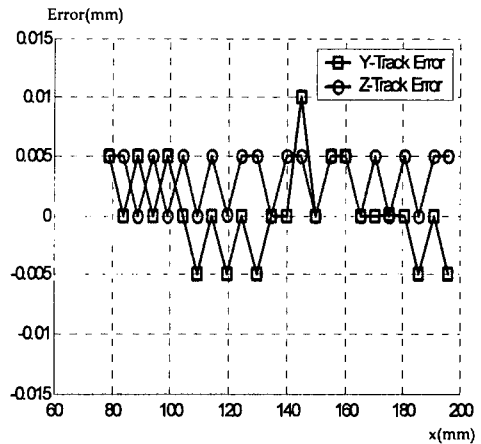


Fig. 19 Error between feedback and robot data

Fig. 19는 이들 각각의 데이터에 대한 센서 피드백 경로와 로봇 제어기상의 모션 경로 각각 비교 오차를 구한 값을 나타내는데 결과적으로 오차범위가 ±0.01mm 내외로 센서 피드백에 의한 실시간 추적 성능에서의 우수성을 확인 할 수 있다.

다음으로 용접대상물의 형상오차에 의한 민감성을 보완하기 위하여 본 연구에서 제안한 RLS기법을 실시하였다. Fig. 20은 xy데이터에 RLS기법을

적용한 경우의 기울기 변화량분포를 나타내며, Fig. 21는 절편값 분포를 보인다.

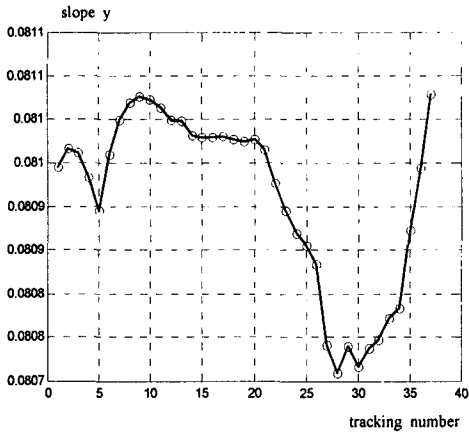


Fig. 20 Slope y for RLS applied

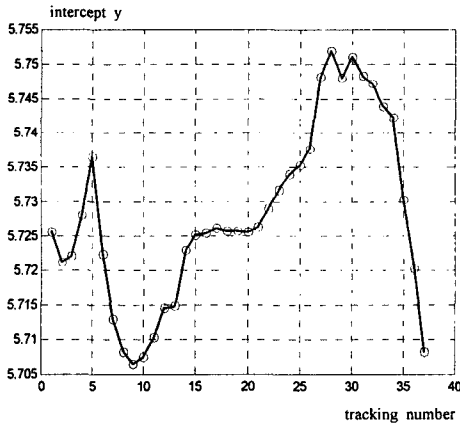


Fig. 21 Intercept y for RLS applied

Fig. 22는 xy 평면의 결과에 RLS 적용전과 적용 후의 레이저 피드백 데이터 결과를 나타내는데 다음의 식(19)로부터 구해지는 상관계수가 RLS 적용 전  $R_{xy} = 0.9905$ 에서 적용 후 상관계수가  $R_{xy} = 0.9999$ 로 직선 모션에 가깝게 접근함을 확인할 수 있었다.

$$R_{xy} = \frac{\frac{1}{n-1} \sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum (y_i - \bar{y})^2}} \quad (19)$$

같은 방법으로 xz평면 데이터에 RLS를 적용한 결과는 Fig. 23, Fig. 24, Fig. 25로 나타났다.

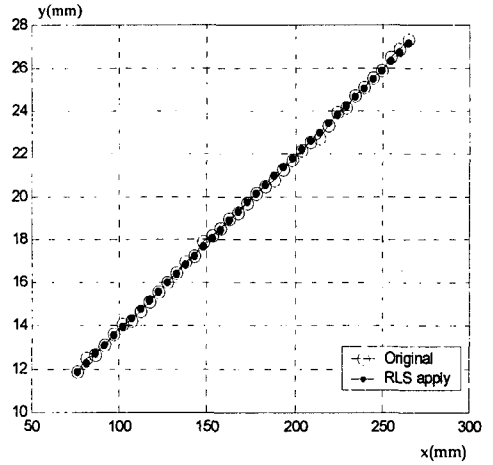


Fig. 22 Tracking xy result for RLS applied

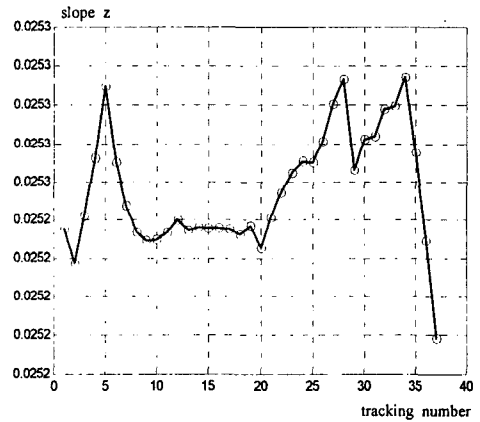


Fig. 23 Slope z for RLS applied

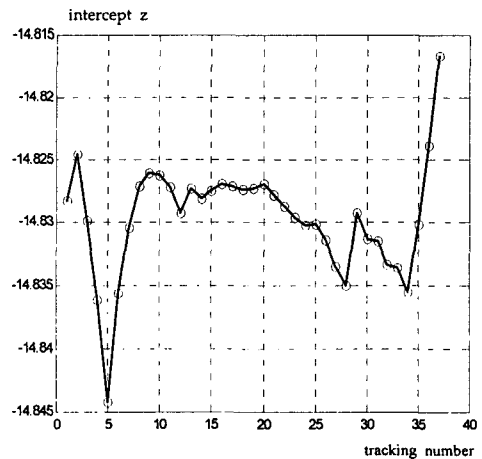


Fig. 24 Intercept z for RLS applied

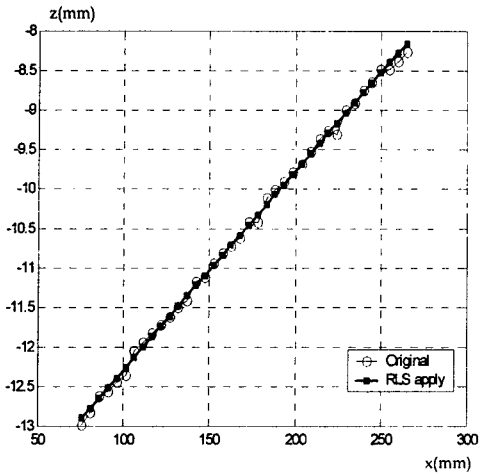


Fig. 25 Tracking xz result for RLS applied

xz 방향에 대해서도 적용 전  $R_{xz}=0.9858$ 에서 적용 후  $R_{xz}=0.9999$ 로 향상되어 민감한 모션을 줄일 수 있음을 확인하였다.

이상의 실험결과들로부터 본 논문에서 제안한 레이저 수직 투사 구조의 실시간 용접선인식 및 추적작업에서 강인한 성능을 완수하였다.

### 5. 결론

본 연구에서는 조선용 선체 블록 용접로봇에 적용 가능하도록 레이저 수직 투사구조 시각장치를 개발하였고 이를 통한 용접토치의 경로 생성과 레이저센서 피드백 사이의 기구학적 관계들을 규명하였다. 또한 선행거리를 가지는 용접선 추적구조에서 실시간으로 경로를 피드백하여 추적을 수행할 수 있는 방법들을 제시하였다. 특히, 용접토치의 경로 생성에 있어 미리 센서 설계 단계에서 고려할 수 있는 보정기법들을 도입함으로써 복잡한 기구학 문제를 단순화하여 안정적인 용접선 추적이 가능하도록 하였으며 빠른 영상처리에 의한 일정한 샘플링 시간을 얻기 위하여 용접물의 형상에 구속적으로 적용할 수 있는 직선 찾기 알고리즘을 소개하였다. 선행거리를 이용한 구속적 샘플링 기법과 모션 민감도를 제어할 수 있는 RLS 필터를 제시하였으며 조선용 선체 블록 제작에 사용되는 Half V형 조인트의 실시간 인식 및 추적 실험을 통하여 강인한 용접선 추적성능을 확인하였다. 본 연구를 통하여 레이저시각 피드백 방식에 의한 실시간 추적 용접

로봇을 조선용 선체 블록의 현장에 적용할 수 있을 것으로 사료된다. 향후에는 토치 위빙 모션 및 용접속도에 관계된 용접선 추적에 대한 연구가 지속되어야 한다.

### 후 기

본 논문은 2003년도 영남대학교 학술연구조성비로 수행되었습니다.

### 참고문헌

1. Shin, C. B., Kim, J. D., Lim, H. K. and Lee, J. W., "A study on development of PC based in-line inspection system with structure light laser," J. of KSPE, Vol. 22, No. 11, pp. 82-90, 2005.
2. Jeong, J. W. and Kang, H. J., "Autonomous Robot Kinematic Calibration using a Laser-Vision Sensor," J. of KSPE, Vol. 16, No. 2, pp. 176-182, 1999.
3. Agapakis, J. E., Katz, J. M., Friedman, J. M. and Epstein, G. N., "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. Sohn, Y. T., Kim, J. S., Cho, H. S. and Koh, K. I., "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. Boillot, J. P. and Yu, X., "Automatic Welding Using Laser Based 3D vision system," Welding in the world/Le soudatage dans le monde., Vol. 34, pp. 173-182, 1994.
6. Sicard, P. and Levine, M. D., "Joint Recognition and Tracking for Robotic Arc Welding," IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. 19, No. 4, pp. 714-728, 1994.
7. Lim, Y. N. and Lee, S. C., "Real time Target Tracking System by Extended Kalman Filter," J. of KSPE, Vol. 15, No. 7, pp. 175-181, 1998.