

바이프리즘 스테레오 시각 센서를 이용한 GMA 용접 비드의 3차원 형상 측정

이지혜* · 이두현** · 유중돈*

*한국과학기술원 기계공학과

** (주)바이오프트로

Measurement of GMAW Bead Geometry Using Biprism Stereo Vision Sensor

Jihye Lee*, Doo Hyun Lee** and Choong Don Yoo*

*Dept. of Mechanical Engineering, KAIST, Daejeon 305-701, Korea

**Biopro, Seongnam, Gyeonggi 463-070, Korea

Abstract

Three-dimensional bead profile was measured using the biprism stereo vision sensor in GMAW, which consists of an optical filter, biprism and CCD camera. Since single CCD camera is used, this system has various advantages over the conventional stereo vision system using two cameras such as finding the corresponding points along the horizontal scanline. In this work, the biprism stereo vision sensor was designed for the GMAW, and the linear calibration method was proposed to determine the prism and camera parameters. Image processing techniques were employed to find the corresponding point along the pool boundary. The iso-intensity contour corresponding to the pool boundary was found in the pixel order, and the filter-based matching algorithm was used to refine the corresponding points in the subpixel order. Predicted bead dimensions were in broad agreements with the measured results under the conditions of spray mode and humping bead. (Received October 7, 2000)

Key Words : Biprism stereo vision sensor, 3D bead profile, Linear calibration method, Image processing method

1. 서 론

아크용접에서 비드의 형상은 용접 품질을 평가하는데 중요한 기준이 되며, 공정 제어에 사용되므로 용접시 비드 형상을 측정할 수 있는 센서가 요구된다. 아크용접시 형상측정을 위해 시각 센서가 널리 사용된다.

용접선을 추적하기 위해 레이저 시각 센서^{1,2)}를 사용하는 연구와 용접 비드의 형상을 측정하는 연구들이 진행되었다. 용접 비드 형상 측정에서는 주로 용융풀 표면의 2차원 형상을 측정하기 위하여 사용되었다. 본 연구에서는 바이프리즘(biprism)과 하나의 CCD 카메라를 사용하여 3차원 용접 비드의 형상을 측정할 수 있는 바이프리즘 스테레오 시각(biprism stereo vision) 센서를 GMA 용접에 적용하고자 한다.

CCD 카메라 등의 시각 센서를 이용하여 용융풀의 크기와 형상을 측정하기 위해 다양한 방법이 시도되었다. 용융풀 표면의 2차원 화상을 얻기 위해 동축 시각 센서(coaxial vision sensor)³⁾가 개발되었으며, 레이저 조명⁴⁾이나 광학필터⁵⁾를 사용하여 깨끗한 용융풀 화상을 획득하였다. 한 대의 카메라를 사용하여 3차원 용융풀 형상을 측정하려는 연구가 진행되었으나⁶⁾ 선택된 평면에서만 신뢰성 있는 측정이 가능하므로 제한된 범위에서 센서의 응용이 가능하다. 그러므로 3차원 용접 비드를 측정할 수 있는 센서는 매우 제한되어 있는 실정이다. 일반적으로 물체의 3차원 형상을 측정하려면 2대의 카메라로 구성된 스테레오 비전(stereo vision) 시스템을 사용한다⁷⁾. 그러나 2대의 카메라를 사용하면 시스템의 크기가 증가하고, 각 카메라의 초점거리와 조리개의 열린 양 등이 다르기 때문에 밝기

값의 변화가 발생한다. 그러므로 스테레오 화상에서 대응점을 찾기 어렵고 화상 처리 시간이 많이 소요된다. 최근 Lee⁸⁾ 등은 한대의 CCD 카메라와 바이프리즘을 이용하여 스테레오 화상을 획득할 수 있는 바이프리즘 스테레오 시각 센서를 제안하였다. 이 방법은 하나의 렌즈와 카메라를 사용하므로 두 대의 카메라를 사용하는 기존 스테레오 비전 시스템에 비해 대응점 문제 (correspondance problem)와 보정(calibration) 문제를 쉽게 해결할 수 있으며 화상 처리 시간이 짧은 장점이 있다. 그러나 field of view(FOV)가 작고 베이스라인이 짧아 가까운 물체에 대해서만 정확도가 높다는 단점이 있다.

본 연구에서는 해상도와 FOV를 고려하여 GMA 용접에 적합하도록 바이프리즘 시각 센서를 설계하였다. 프리즘과 카메라 인자를 결정하기 위한 선형 보정식(linear calibration equation)을 제안하였고, 이를 적용하여 보정을 수행하였다. 보정된 시각 센서를 사용하여 GMA 용접부의 스테레오 화상을 획득하였으며, 용접 비드의 대응점을 픽셀(pixel)과 서브픽셀(subpixel) 단위로 검출하였다. 화상처리를 통하여 3차원 비드 형상을 계산한 결과를 측정 결과와 비교하였다.

2. 바이프리즘 스테레오 시각 센서의 설계 및 보정

2.1 바이프리즘 스테레오 시각 센서의 원리

바이프리즘 스테레오 시각 센서는 Fig.1에 나타낸 바와 같이 기하 광학(geometric optics)으로 설명할 수 있다. Fig. 1에서 α 는 바이프리즘의 경사각, 첨자 p와 c는 각각 프리즘 좌표계와 카메라 좌표계를 나타낸다. 임의의 점 $\bar{x}_p(x_p, y_p, z_p)$ 는 바이프리즘의 두 경사면에 의해 카메라에 한쌍의 스테레오 화상 (stereo image pair)을 형성한다. 이것은 바이프리즘 없이 두 개의 가상점을 가정하여 투영하는 것과 동일하며, 좌우측에 위치한 가상점인 \bar{x}_{p_l} 과 \bar{x}_{p_r} 은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \bar{x}_{p_l} &= T_l \bar{x}_p \\ \bar{x}_{p_r} &= T_r \bar{x}_p \end{aligned} \quad (1)$$

$$\text{where } T_l = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\tan \delta_p & \delta_p \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix},$$

$$T_r = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \tan \delta_p & \delta_p \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix},$$

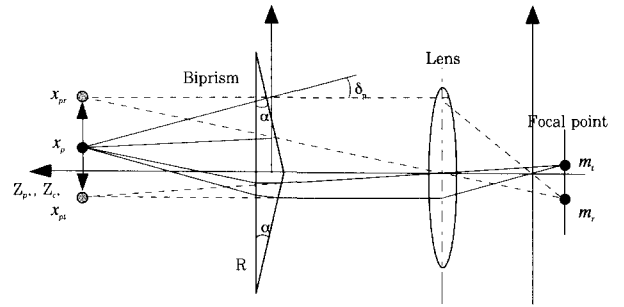


Fig. 1 Schematics of biprism stereo vision sensor

이때, δ_p 는 프리즘의 변환각(deviation angle), 첨자 l과 r은 각각 좌우측을 의미한다. 변환각 δ_p 는 프리즘의 굴절률 n과 경사각 α 의 함수이다⁹⁾.

두 개의 가상점이 화상면에 투영될 때 화상면에서의 좌표는 좌우측 투영 행렬 R_l, P_r 을 이용하여 식(2)와 같이 나타낼 수 있으며 각각의 투영행렬은 식(3), (4)와 같다.

$$s \bar{m}_l = P_l \bar{x}_p \quad (2)$$

$$s \bar{m}_r = P_r \bar{x}_p$$

$$\text{where } \bar{m}_l = [u_l \ v_l \ 1]^T, \bar{m}_r = [u_r \ v_r \ 1]^T$$

$$P_l = \begin{bmatrix} \alpha_u & 0 & u_0 \\ 0 & \alpha_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} [R \ \bar{t}] \begin{bmatrix} T_l & O_3^T \\ 0_3 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$P_r = \begin{bmatrix} \alpha_u & 0 & u_0 \\ 0 & \alpha_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} [R \ \bar{t}] \begin{bmatrix} T_r & O_3^T \\ 0_3 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

위의 식에서, s는 스케일 인자, u와 v는 수평과 수직 방향의 픽셀 위치, (α_u, α_v) 는 픽셀 폭과 픽셀 높이에 대한 초점거리, (u_0, v_0) 는 화상면의 중심, R과 t는 각각 프리즘과 카메라 좌표계 사이의 회전 행렬과 변위 벡터이다.

프리즘 좌표계가 카메라 좌표계의 Z_c 축에 대해서 θ_z 의 회전과 t_z 의 변위를 가진다면, 프리즘 좌표계와 카메라 좌표계 사이의 변환 행렬은 다음과 같다.

$$\bar{x}_c = \begin{bmatrix} R & t \\ 0_3 & 1 \end{bmatrix} \bar{x}_p = \begin{bmatrix} \cos \theta_z & \sin \theta_z & 0 & 0 \\ -\sin \theta_z & \cos \theta_z & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \bar{x}_p \quad (5)$$

식(5)를 식(2)에 대입하여 스케일인자 s로 나누면 실제 화상에서의 픽셀좌표를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \frac{1}{z_p + t_z} \begin{bmatrix} \alpha_u(x_p - z_p \cos \theta_z \tan \delta_p) + u_0(z_p + t_z) \\ \alpha_v(y_p + z_p \sin \theta_z \tan \delta_p) + v_0(z_p + t_z) \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$= \begin{bmatrix} u_r \\ v_r \end{bmatrix} \frac{1}{z_p+t_z} \begin{bmatrix} \alpha_u(x_p+z_p \cos\theta_z \tan\delta_p) + u_0(z_p+t_z) \\ \alpha_v(y_p-z_p \sin\theta_z \tan\delta_p) + v_0(z_p+t_z) \end{bmatrix}$$

프리즘 좌표계가 카메라 좌표계와 평행하면 (즉, $\theta_z=0$), 식(4)에서 v_r 과 v_i 가 같아지며 이는 대응점이 수평방향 스캔라인 위에 위치함을 나타낸다.

좌우측 화상에서 스캔라인을 따라 대응점이 결정되면 카메라 좌표계에 대한 3차원 공간상의 실제 위치는 다음과 같이 유도된다.

$$\begin{aligned} x_c &= \frac{z_c}{\alpha_u} \left(\frac{u_r + u_i}{2} - u_0 \right) \\ y_c &= \frac{z_c}{\alpha_v} \left(\frac{v_r + v_i}{2} - v_0 \right) \\ z_c &= \frac{t_z}{1 - \frac{(\xi_u/\alpha_u)^2 + (\xi_v/\alpha_v)^2}{2 \tan \delta_p}} \end{aligned} \quad (7)$$

where $\xi_u = u_r - u_i, \xi_v = v_r - v_i$

이때, ξ_u 와 ξ_v 는 각각 수평과 수직방향으로 대응점이 떨어진 변위(disparity)를 나타낸다.

카메라 좌표계에 대한 3차원 위치가 결정되면 월드(world) 좌표계에 대한 3차원 위치는 다음과 같이 변환 행렬을 이용하여 계산할 수 있다.

$$\bar{x}_c = \begin{bmatrix} R^* & \bar{t}^* \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \bar{x}_w = \begin{bmatrix} \bar{r}_1 & \bar{t}_1^* \\ \bar{r}_2 & \bar{t}_2^* \\ \bar{r}_3 & \bar{t}_3^* \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \bar{x}_w \quad (8)$$

월드 좌표계에서의 투영행렬은 식(5), (8)을 식(2), (3), (4)에 대입하여 다음과 같이 구한다.

$$s \bar{m}_u = P_{Lw} \bar{x}_p \quad (9)$$

$$s \bar{m}_v = P_{rw} \bar{x}_p$$

$$P_{Lw} = \begin{bmatrix} \alpha_u & 0 & u_0 \\ 0 & \alpha_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} R \bar{t} \begin{bmatrix} T_t & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & \bar{t} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} R^* & \bar{t}^* \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$P_{rw} = \begin{bmatrix} \alpha_u & 0 & u_0 \\ 0 & \alpha_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} R \bar{t} \begin{bmatrix} T_r & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & \bar{t} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} R^* & \bar{t}^* \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

2.2 시스템의 설계 및 보정

해상도와 FOV는 3차원 시각 센서의 성능을 나타내는 중요한 요소이다. $\theta_z=0$ 을 가정할 때, 식(7)로부터 카메라 축방향 거리 해상도는 프리즘에서의 거리 z_p 에 대한 수평방향 변위의 변화율로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{d\xi_u}{dz_p} = \frac{2t_z \alpha_u \tan \delta_p}{(z_p+t_z)} \quad (12)$$

이때, t_z 는 프리즘과 카메라 간의 거리이며, t_z 는 센서의 크기에 의해 제한되므로 해상도는 주로 프리즘의 변환각에 의해 결정된다. 변환각이 증가할수록 해상도가 높아지지만, 프리즘과 카메라의 FOV에 의해 최대 변환각이 제한된다. Fig. 2에 보인 바와 같이 가상점의 최대 X_p 방향 위치는 $2z_p \tan \delta_p$ 이고 카메라의 FOV는 $(z_p+t_z) \tan \delta_c$ 이므로 최대 변환각은 카메라의 FOV에 의해 다음과 같이 제한된다.

$$\delta_p < \tan^{-1} \frac{(z_p+t_z) \tan \delta_c}{2z_p} \quad (13)$$

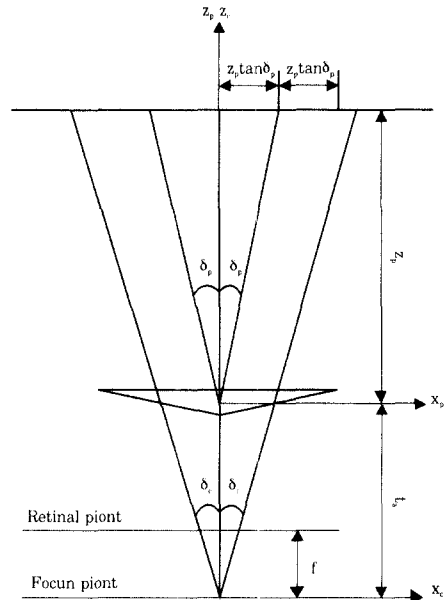


Fig. 2 FOV of biprism and camera

바이프리즘 스테레오 시각 센서로 3차원 형상을 측정하려면 카메라 내부 인자(intrinsic parameter)와 프리즘 인자를 보정하여야 한다. Lee⁸⁾는 비선형 방법을 사용하여 바이프리즘을 보정하므로 보정 과정이 복잡하고 보정 결과가 초기값에 의해 영향을 받는 단점이 있다¹⁰⁾. 본 연구에서는 초기값에 무관하며 하나의 스테레오 화상으로부터 카메라 인자와 프리즘 인자를 동시에 계산할 수 있는 선형 보정 방법을 제안하였다.

월드 좌표계가 임의의 위치에 있을 경우에 식(10), (11)의 투영행렬 P_{Lw} 과 P_{rw} 을 이용하여 다음의 선형 보정식을 유도하였다.

$$\frac{P_{Lw} + P_{rw}}{2} = \begin{bmatrix} \alpha_u \bar{r}_1 + u_0 \bar{r}_3 & \alpha_u f_x^* + u_0 f_z^* \\ \alpha_u \bar{r}_2 + v_0 \bar{r}_3 & \alpha_u f_y^* + v_0 f_z^* \\ \bar{r}_3 & f_z^* \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$\frac{P_{r,w} - P_{l,w}}{2} = \begin{bmatrix} \alpha_p \tan \delta_p \cos \theta_z \bar{r}_3 & \alpha_p \tan \delta_p \cos \theta_z (t_z^* - t_z) \\ \alpha_p \tan \delta_p \sin \theta_z \bar{r}_3 & -\alpha_p \tan \delta_p \sin \theta_z (t_z^* - t_z) \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

식(14)는 카메라 내부 인자로 구성되어 있다. 그러므로 $P_{l,w}$ 와 $P_{r,w}$ 가 주어지면 식(14)으로부터 카메라 인자와 r_3 , t^* 를 계산하고, 이를 식(15)에 대입하여 프리즘 인자를 구할 수 있다.

3. 실험 장치 및 조건

실험 장치를 Fig. 3에 보인 바와 같이 바이프리즘 스테레오 시각 센서, 화상처리 보드, 아크 빛 차단막(arc light blocker), GMA 용접 시스템, 3축 직교형 로봇으로 구성하였다. 시각 센서는 용융풀의 화상을 획득하도록 용접 토치의 뒤에 설치되어 토치와 함께 직교 좌표 로봇에 의하여 이동한다. 바이프리즘 스테레오 시각 센서는 보호용 유리판, 광학 필터(880nm 대역 통과 필터), 바이프리즘, CCD 카메라로 구성되며 용융풀 및 용접 비드의 화상획득에 사용된다. 획득한 화상은 DSP 화상 처리보드를 이용하여 640(H) × 480(V)로 저장하였다. 아크 빛 차단막은 강한 아크 빛과 스파터로부터 센서를 보호하는 역할을 한다. GMA 용접은 용량 350A인 정전압 인버터 용접기를 사용하였고, 보호가스로 유량 20l/min의 아르곤 100%를 사용하였다. 용접 와이어는 직경 1.2mm인 YGW-15를 사용하였으며, 저탄소강 SS41에 비드(bead-on-plate) 용접하였다. 전류 270A, 전압 32V, 용접속도 5.3mm/s의 스프레이 모드와 전류 270A, 전압 26V, 용접속도 15.9mm/s의 험핑 비드(humping bead)에서 화상을 획득하였다.

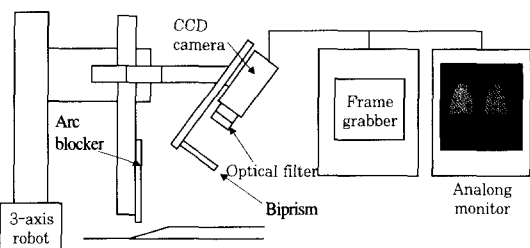


Fig. 3 Schematics of experimental system

4. 결과 및 고찰

4.1 바이프리즘 시각 센서의 설계

GMA 용접 공정을 고려하여 2.2절에 제시한 설계조건을 만족하도록 시각 센서를 설계하였다. 식(12)로부터 $\alpha_p = 2300$, $t_z = 95\text{mm}$ 인 경우 물체와 프리즘 사이의 거리와 변환각이 카메라 거리 해상도에 미치는 영향을

Fig. 4에 나타내었다. 변환각이 증가하거나 물체와 프리즘사이의 거리가 가까워질수록 해상도가 증가한다.

Fig. 4를 이용하여 1 pixel/mm(즉, $d\xi_u/dz_p = 1$)의 최소 거리 해상도를 갖도록 $\delta_p = 6.5^\circ$ 와 $z_p = 128\text{mm}$ 를 선택할 수 있다. 카메라의 FOV를 나타내는 각도인 δ_c 는 9.25° 이며, 이를 이용하여 식(13)으로부터 구한 최대 변환각은 11.4° 이다. 이는 Fig. 4의 변환각 범위인 6.0° 와 7.5° 사이의 값을 만족시킨다.

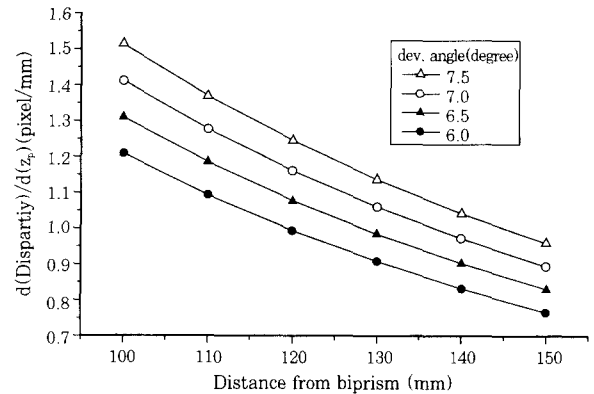


Fig. 4 Effects of deviation angle and object distance on resolution

비드 폭을 20mm로 가정하면, 변환각이 6.5° 와 7.0° 인 경우 투영되는 비드 폭을 Fig. 5에 나타내었으며, 비드의 관심 영역이 카메라에 투영됨을 알 수 있다. 두 변환각이 설계조건을 만족하지만, 해상도를 높이기 위하여 변환각으로 7.0° 를 선정하였다.

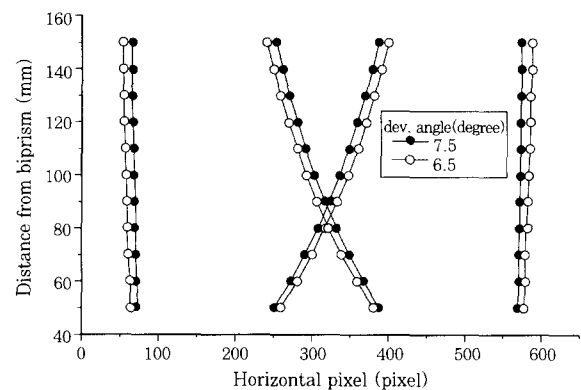
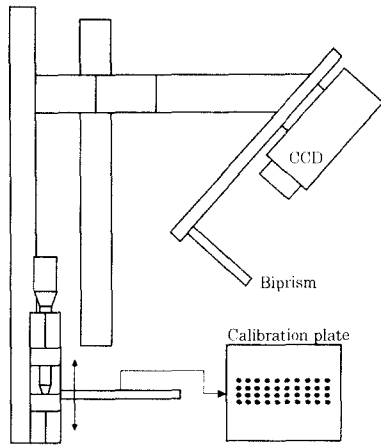


Fig. 5 Simulation results of bead width

4.2 카메라와 프리즘의 보정

바이프리즘 시각 센서를 보정하려면 좌우측 투영행렬을 구해야 하며, 이를 위하여 Faugeras^[11]의 방법을 사용하였다. 이 방법은 동일 평면상에 위치하지 않는 6개 이상의 위치 정보가 필요하지만, 신뢰성 있는 보정 결과를 얻기 위해 일반적으로 60개 이상의 위치 정보를 사용한다. 보정에 사용된 위치 정보를 얻기 위하여 Fig. 6에 보인 보정판을 사용하였다. 27개의 원이



One-directional translation stage

Fig. 6 Configuration of calibration setup

표시된 보정판을 4번 이동하여 얻은 108쌍의 대응점으로부터 108개의 위치정보를 획득하였다.

108개의 위치정보로부터 좌우측 투영행렬을 얻은 후, 카메라 인자와 좌표계간의 변환 행렬을 구하고 이로부터 프리즘 인자를 계산하여 Table 1에 정리하였다. 보정 결과인 $\delta_p = 7.022^\circ$ 와 $t_z = 96.05\text{mm}$ 는 설계값인 $\delta_p = 7.0^\circ$ 와 $t_z = 95\text{mm}$ 와 거의 일치한다. 프리즘과 카메라 사이의 z축 회전값이 $\theta_z = 0.099^\circ$ 로 계산되었으며, 이는 대응점이 수평방향 스캔라인에 위치함을 의미한다.

Table 1 Calibration results of biprism vision sensor

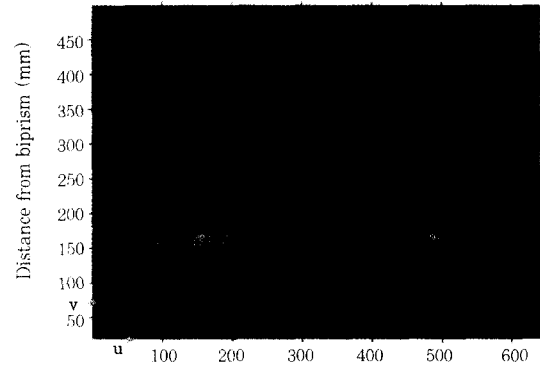
δ_p	7.022°
t_z	96.05mm
θ_z	0.099°
α_u	2369.8
α_v	2294.2
u_0	296.1 (in pixel)
v_0	296.9 (in pixel)
$[R^* \quad \vec{t}^*]$	$\begin{bmatrix} 0.9999 & -0.0129 & -0.0065 & 0.3476 \\ -0.0039 & -0.7731 & 0.6342 & 2.9122 \\ -0.0132 & -0.6341 & -0.7731 & 221.27 \end{bmatrix}$

4.3 용접 비드의 형상 측정

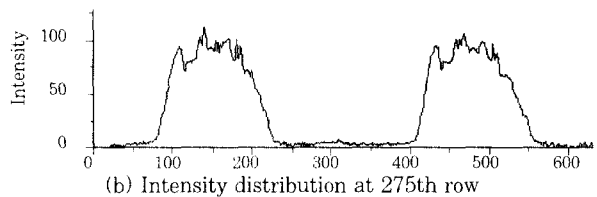
스프레이 모드에서 바이프리즈 스테레오 시각 센서를 이용하여 획득한 용융풀의 화상과 275번째 스캔라인(scanline)의 밝기값 분포를 Fig. 7에 나타내었다.

바이프리즈 화상에서 좌우측 화상의 밝기값 분포가 유사하고 대응점은 수평방향의 스캔라인을 따라 존재한다. 3차원 형상 정보는 대응점 사이의 변위로부터 구할 수 있다. 그러므로 스캔라인을 따라 용접 비드의 형상 정보를 나타내는 대응점(corresponding point)을 추출하여 비드의 3차원 형상을 계산하였다.

Fig. 8(a)는 용융풀 주위의 등밝기값(iso-intensity)



(a) Stereo image pair of molten pool surface



(b) Intensity distribution at 275th row

Fig. 7 Stereo image of molten pool surface and intensity distribution

분포를 나타내었다. 용융풀 경계의 등밝기값 곡선이 비드 폭과 높이 등의 정보를 포함하므로 좌우 화상의 등밝기값 곡선으로부터 대응점을 추출하여 비드의 3차원 형상을 구할 수 있다. 비드 폭과 길이 정보를 포함하도록 용융풀 경계에 위치한 등밝기값 곡선을 선택하는 것이 필요하기 때문에 용융풀 뒤편에 위치한 스캔라인의 평균값을 등밝기값 곡선의 기준 밝기값으로 선정하였다. 전처리 과정으로 노이즈(noise)를 감소시키기 위하여 스캔라인을 따라 5×1 메디안 필터링(median filtering)하였다. 좌우측 화상의 각각 왼쪽과 오른쪽에서부터 스캔하면서 처음으로 기준 밝기값에 이르는 점을 선정하여 등밝기값 곡선을 구성하였다. 등밝기값 곡선을 Fig. 8(b)에 나타내었으며, 이와 같은 등밝기값 곡선을 픽셀 단위의 대응점으로 결정하였다.

서브픽셀 단위의 대응점을 구하기 위하여 바이프리즈 화상의 좌우측 밝기값 분포가 유사한 특징을 이용하여 영역 기반 매칭 알고리즘을 사용하였다. Jones와 Malik¹²⁾이 한 개의 화상에서 많은 정보를 추출하여 대응점을 정확하게 찾을 수 있는 다차원 필터링 알고리즘을 제안하였으며 다음과 같이 정의된다.

$$e = \sum |F_k \times I_x(x,y) - F_k \times I_x(x+i,y+i)| \quad (16)$$

$$F_k(x,y) = G_n(x) \times G_n(y), \quad n = 1, 2, 3 \quad (17)$$

이때, e와 F_k 는 매칭 오차(matching error)와 다차원 필터, I_x 와 I_y 는 좌우측 화상의 밝기값을 나타낸다. $G_n(x)$ 는 가우시안 분포의 n번 미분을 나타내며,

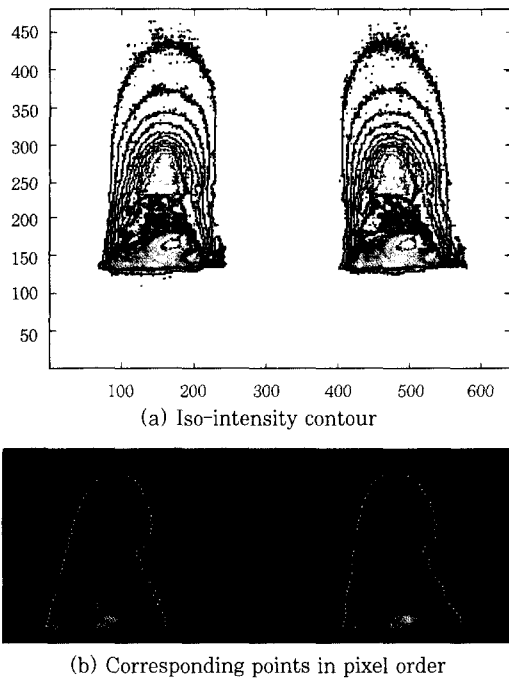


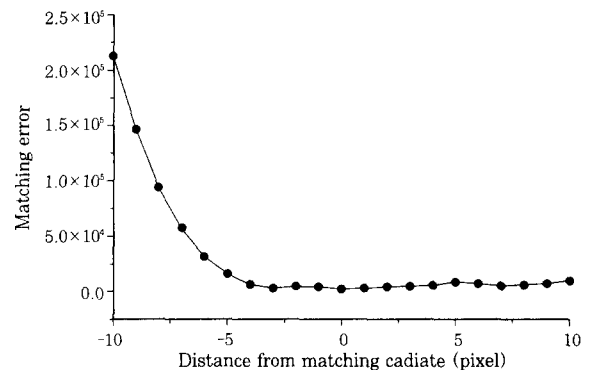
Fig. 8 Image processing results of spray mode bead

가우시안 분포의 표준 편차는 1.875 이다.

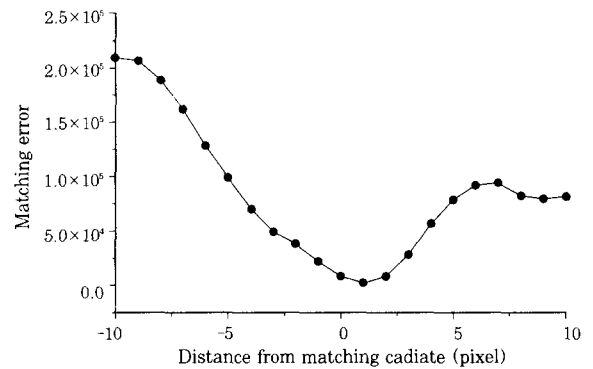
본 연구에서는 앞서 구한 픽셀 단위의 대응점 주위에서 식(16)의 매칭오차를 계산하였으며 최소의 오차를 갖는 점 주위에서 매칭오차를 2차원 근사하여 서브픽셀 단위의 대응점을 추출하였다. Fig. 9는 Fig. 8(b)에 보인 픽셀 단위의 대응점 주변에서 계산한 매칭 오차의 분포를 나타낸다. Fig. 9(a)는 용융풀 꼬리 주변에서의 오차 분포이며, 이 부근의 밝기값 변화가 완만하여 매칭 오차 곡선에 뚜렷한 최소점이 존재하지 않기 때문에 정확한 대응점을 찾기 어렵다. 그러나 뚜렷한 용융풀 경계에서는 Fig. 9.(b)와 같이 매칭 오차 분포에서 최소점이 존재하므로 대응점을 정확하게 검출할 수 있다.

픽셀 단위의 대응점과 서브픽셀 단위의 대응점으로 부터 계산한 스프레이 모드의 3차원 비드형상은 Fig. 10과 같으며, 이때 월드 좌표계의 X_w, Y_w, Z_w 축은 각각 용접 비드의 폭, 길이, 높이방향을 나타낸다. 비드 폭과 길이는 픽셀단위와 서브 픽셀 단위의 대응점에서 구한 경우가 비슷한 정확도와 경향을 보인다. 비드 높이는 낮은 해상도로 인해 심하게 변화하지만 서브 픽셀 단위로 계산한 경우에 픽셀단위로 계산한 경우보다 완만하게 비드 윤곽을 나타낸다. 계산 결과와 비교하기 위하여 용접이 끝난 후 용접이 안정된 부분의 단면 화상을 획득하여 용접부 크기를 실험적으로 1회 측정하였다. 비드 폭의 오차는 0.46%이고, 높이의 오차는 픽셀단위로 계산한 경우 9.7%, 서브픽셀 단위로 계산한

경우 14.86%이다. 비드 프로파일의 요동이 작으므로 실제 비드 프로파일과 정성적으로 더 일치한다. 또한 픽셀단위로 구한 경우 왼쪽 프로파일에서 아크에서 멀어질수록 비드 높이가 오히려 낮아지는 경향을 보이지만 서브픽셀 단위로 계산한 경우 한 번의 큰 요동을 제외하고는 좌우측 프로파일이 거의 일치하는 경향을 보인다. 그러므로 서브픽셀 단위로 계산한 비드 프로파일의 오차가 픽셀단위로 계산한 경우보다 크다 할지라도 정성적 유사성과 안정성면에서 서브픽셀의 경우가 우수하다. 오차는 비드 높이 방향의 낮은 해상도, 대응점 추출오차와 픽셀 단위에서의 용융풀 경계 선택 오류 등에 의해 발생한 것으로 추정된다.



(a) Matching error curve at failed point



(b) Matching error curve at successful point

Fig. 9 Distribution of matching error

험핑 비드가 발생하는 경우에 용융부의 형상을 Fig. 11(a)에 나타내었다. 스프레이 모드의 경우와 유사한 방법으로 등밝기값 곡선을 추출하여 픽셀단위의 대응점과 서브픽셀단위의 대응점을 결정하였다. 험핑 비드의 3차원 형상을 계산하여 Fig. 11(b)와 11(c)에 나타내었으며, 험핑 비드에서 높이와 최대 폭을 측정된 결과와 비교하였다. 픽셀 단위 대응점과 서브 픽셀 단위 대응점을 이용한 계산 결과와 실험 결과는 비드 높이의 경우에 각각 2.92%와 17.71%의 오차가 발생하였으며, 비드 폭의 경우에 각각 0.47%, 0.63%의 오차가 발생하였다.

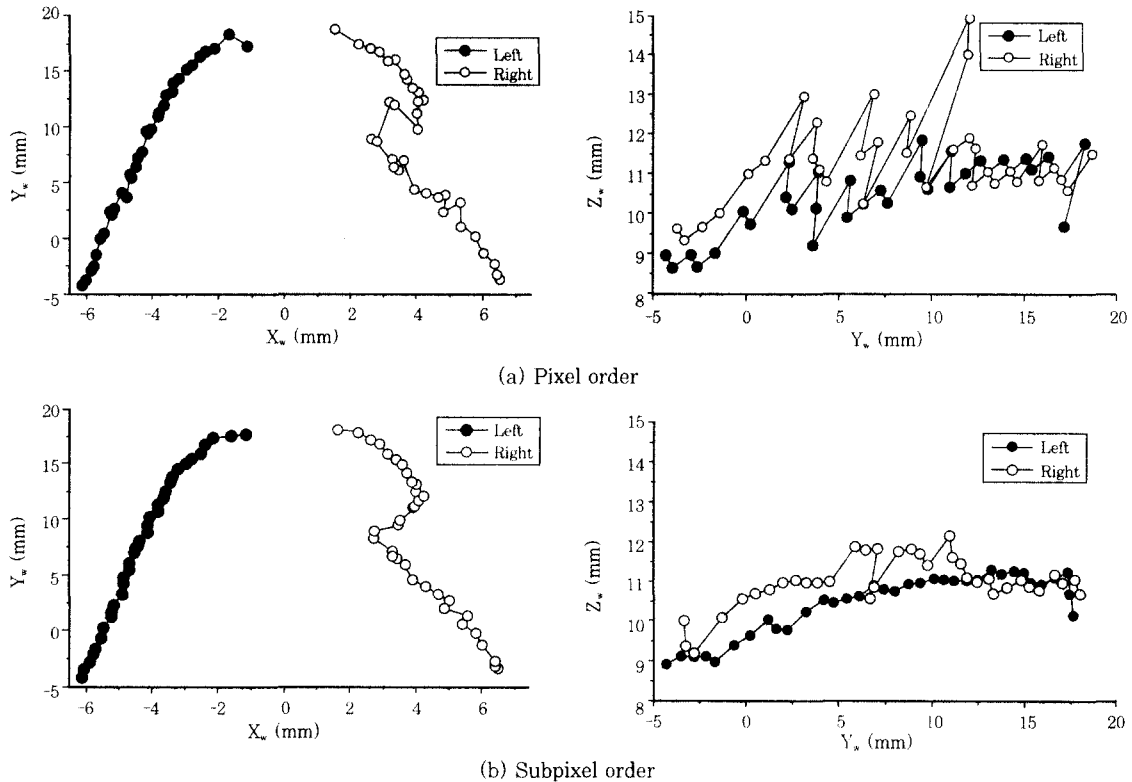


Fig. 10 Bead dimensions of spray mode

바이프리즘 스테레오 시각 센서를 이용하여 비드 폭을 매우 정확하게 예측할 수 있었다. 그러나 비드 높이의 정확도가 비드 폭에 비해 낮지만, 대략적인 추세는 일치하는 경향을 보인다. GMA 용접 공정의 열악한 환경을 고려할 때 깊이 방향의 해상도를 향상시키고 화상처리 방법을 개선하면 바이프리즘 스테레오 시각 센서를 공정 모니터링과 제어에 적용하는 것이 가능할 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서 바이프리즘 스테레오 시각 센서를 GMA 용접에 적용하여 용접 비드의 3차원 형상을 측정하였고 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 해상도와 FOV, 용접비드의 크기를 고려하여 GMA 용접에 적합하도록 바이프리즘 스테레오 시각 센서를 설계하였으며, 센서의 보정을 위하여 효율적인 선형 보정 방법을 제안하였다.
2. 용접 화상에서 등밝기값 곡선을 추출하여 다차원 필터링 방법을 적용하였으며, 픽셀 단위의 용접 비드 형상과 서브픽셀 단위의 용접 비드 형상을 계산하였다.
3. 화상처리를 통하여 구한 용접 비드의 폭과 길이는 측정 결과와 일치하였다. 비드의 높이는 비드의 폭이나 길이보다 부정확하지만, 측정 결과와 개략적으로

일치하는 경향을 보인다.

4. 바이프리즘 스테레오 시각 센서를 다양한 용접조건에 적용하며, 깊이 방향의 오차를 줄이기 위한 연구가 요구된다.

후 기

본 연구는 한국과학재단의 국제공동연구 (996-1000-002-2)의 지원을 받아 수행하였으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 조태동, 양상민, 전진환 : 비전 센서를 이용한 용접선 자동추적에 관한 연구, 대한용접학회지, 16-6(1998), 68-76
2. 김정호, 유중돈, 김진오, 신정식, 김성권 : 선박 소조립 공정용 로봇 자동 교시 시스템의 구현, 대한용접학회지, 14-2(1996), 96-105
3. R.W. Richardson, R.A. Gutow, R.A. Anderson and D.F. Farson : Coaxial Arc Weld pool Viewing for Process Monitoring and Control, Welding Journal, 63-3(1984), 43-50
4. H. Nomura, J.E. Middle and I. Masumoto : Sensors and Control Systems in Arc Welding, Chapman & Hall, 1994
5. 배강열, 이지형, 정수원 : 파이프의 가스메탈 아크 용접에 있어

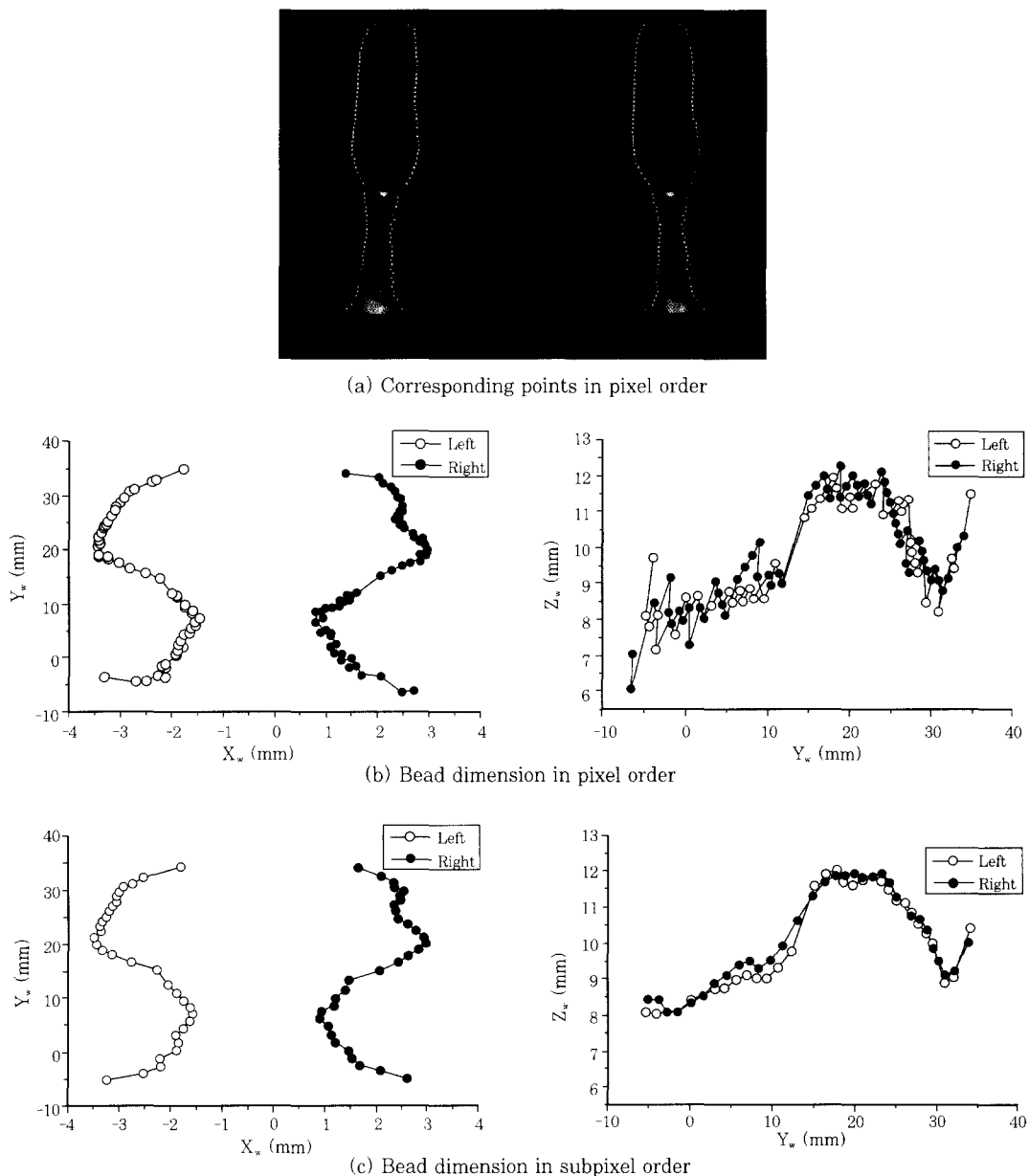


Fig. 11 Humping bead image and bead dimensions

- 센서 시스템을 이용한 용융지 제어 및 용접선 추적에 관한 연구, 대한용접학회지, 16-5(1998), 119-153
6. R. Kovacevic, Y.M. Zhang and L. Li : Monitoring of Weld Joint Penetration based on Weld Pool Geometrical Appearance, *Welding Journal*, 75-10(1993), 317s-329s
 7. S.T. Barnard and M.A. Fischler : Computational stereo, *Computing Surveys*, 14-4(1982), 553-572
 8. D.H. Lee, I.S. Kweon and R. Cipolla : A Biprism Stereo Camera System, *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition(CVPR'99)* Fort Collins USA, 1999, 82-87
 9. M. Bass and W.V. Stryland : *Handbook of Optics I, II*, McGraw-Hill, 1996
 10. O. Faugeras : *Three Dimensional Computer Vision*, The MIT Press, London, 1993
 11. O.Faugeras and G. Toscani : The Calibration Problem for Stereo, *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, CVPR'86*, 1986, 15-20
 12. D.G. Jones, J. Malik : Computational Framework for Determining Stereo Correspondence from a Set of Linear Spatial Filters, *Image and Vision Computing*, 10-10(1992), 699-708