

< 논 문 >

용접 자동화를 위한 주사빔을 이용한 시각센서에 관한 연구

유원상* · 나석주*

(1995년 6월 28일 접수)

A Study on the Vision Sensor Using Scanning Beam for Welding Process Automation

Won-Sang You and Suck-Joo Na

Key Words : Vision Sensor(시각센서), Scanning Laser Beam(주사레이저빔), Optical Triangulation(광삼각법), Scheimpflug's Condition(Scheimpflug 조건), Image Processing Algorithm(영상처리 알고리즘)

Abstract

The vision sensor which is based on the optical triangulation theory with the laser as an auxiliary light source can detect not only the seam position but the shape of seam. In this study, a vision sensor using the scanning laser beam was investigated. To design the vision sensor which considers the reflectivity of the sensing object and satisfies the desired resolution and measuring range, the equation of the focused laser beam which has a Gaussian irradiance profile was firstly formulated. Secondly, the image forming sequence, and thirdly the relation between the displacement in the measuring surface and the displacement in the camera plane was formulated. Therefore, the focused beam diameter in the measuring range could be determined and the influence of the relative location between the laser and camera plane could be estimated. The measuring range and the resolution of the vision sensor which was based on the Scheimpflug's condition could also be calculated. From the results mentioned above a vision sensor was developed, and an adequate calibration technique was proposed. The image processing algorithm which can recognize the center of joint and its shape informations was investigated. Using the developed vision sensor and image processing algorithm, the shape informations of the vee-, butt- and lap joint were extracted.

1. 서 론

아크용접공정에서 고도의 자동화를 위해서는 용접을 해야 할 부분을 추적하고 용접변수를 자동으로 조절할 수 있도록 용접선의 위치와 용접부 형상을 측정할 수 있는 센서의 개발이 필요하다.^(1,2) 광

삼각법의 원리를 이용하는 시각센서는 용접공정과는 무관하게 측정이 이루어지고 용접선의 위치정보뿐만 아니라 용접부의 형상정보도 얻어낼 수가 있어서 용접선 추적과 용접공정 모니터링 및 용접변수 제어가 가능하다. 따라서 자동용접을 위한 센서로 가장 많이 연구되어지고 있으며, 적용도 활발히 이루어지고 있다. 본 논문에서는 용접공정에 적용되는 시각센서중 주사빔(scanning beam)을 이용한 시각센서 제작시 필요한 이론을 제시하고 제시된

*회원, 한국과학기술원 기계공학과

이론을 기반으로 센서를 설계하고, 실제 용접부에 적합한 형상인식 알고리즘을 제시하였다.

2. 주사빔을 이용한 시각센서의 이론적 배경

광삼각법의 원리(optical triangulation theory)를 이용한 시각센서는 자유도가 하나 적은 카메라의 영상좌표로부터 측정물이 위치하는 실제 좌표계에서의 위치정보를 얻어내야 하므로 추가로 구속조건이 필요한데, 보통 레이저를 보조광으로 사용해서 영상좌표와 실제 측정물의 위치좌표 사이를 관련시켜 주는 식을 하나 추가해 준다. 광삼각법을 이용하는 시각센서는 원통형 렌즈(cylindrical lens)를 사용해서 평면형태로 구조화된 레이저빔(laser beam)을 측정부에 조사하고 2차원 카메라로 이를 감지하는 형태의 것과 주사빔을 이용한 시각센서로 나눌 수가 있다. 주사빔을 이용하는 센서가 주사메카니즘의 추가로 인해 구조가 크고 복잡한 반면에 집광된 점형태의 레이저 빔을 사용하므로 신호대잡음비가 커서 아크광이나 스패터 등의 노이즈에 영향을 덜 받아 전처리(preprocessing)과정이 간결하며 측정부의 표면조건에 상대적으로 영향을 적게 받는다. 또한 구조화된 빔을 사용하는 센서와 달리 주사메카니즘의 입력신호에 따라 측정범위를 임의로 변경시켜 줄 수 있는 장점이 있다. 주사빔을 이용한 시각센서는 Fig. 1에서와 같이 집광시킨 점(focused spot) 형태의 레이저빔을 갈바노미터(galvanometer)에 부착된 평면거울로 반사시켜 측

정부에 주사해 주는데, 이 주사빔이 반사되는 높이에 따라 카메라에서의 영상면에서 상이 맺히는 위치가 달라진다.⁽³⁾ 주사빔을 이용한 시각센서는 주사빔 상에서의 측정물의 위치를 영상면에서의 영상좌표를 이용해서 구하고 주사기구의 주사각으로부터 주사빔의 방향을 구한 뒤, 이를 통해 측정물의 3차원 위치를 구할 수 있다.

Fig. 2와 같이 렌즈면과 영상면이 레이저선상의 한 점에서 만나도록 렌즈면과 영상면의 배치를 하면 측정구간의 전 범위에 걸쳐서 완전히 초점이 맞은 영상을 얻을 수가 있다. 이렇게 Scheimpflug's 조건을 적용할 경우 카메라의 초점심도(depth of field)를 위해서 렌즈의 구경(aperture stop)을 작게 해줄 필요가 없고, 비초점화(defocusing)에 의한 분해능의 감소를 피할 수가 있다.⁽⁴⁻⁶⁾

센서를 평가할 때 가장 중요한 요소인 분해능(resolution)과 정확도(accuracy)는 보조광으로 사용하는 레이저 빔의 크기에도 영향을 받는다. Fig. 3에서와 같이 가우시안 조사도분포(Gaussian irradiance pattern)를 가지는 평행광화(collimation)된 빔을 볼록렌즈를 이용하여 측정하고자 하는 물체에 조사하였을 때, 가우시안 분포의 빔에서 조사도가 중심에서의 최대 조사도의 $1/e^2$ 이 되는 곳을 가우시안 빔의 반지름(Gaussian beam radius) w 로 정의하면, 이때 $z \gg \pi w^2/\lambda$ 인 경우 w 는 식 (1)과 같이 근사되고 초점에서의 빔의 지름은 식 (2)와 같이 나타난다.

$$w(z) \cong \frac{\lambda z}{\pi w_0} \quad (1)$$

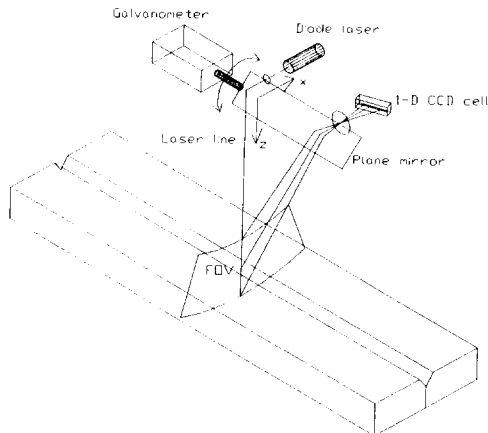


Fig. 1 Vision sensor using scanning beam

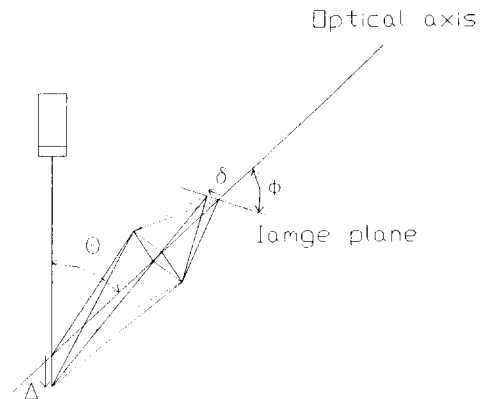


Fig. 2 Structures of sensor using Scheimpflug's condition

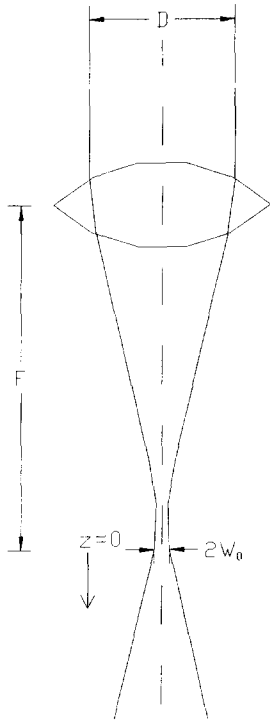


Fig. 3 Laser beam focused by lens

$$2w_0 = \frac{4\lambda}{\pi} \left(\frac{F}{D}\right) \quad (2)$$

여기에서, F 는 집광렌즈의 초점거리(focal length)이고, D 는 평행광화된 레이저빔의 지름(collimated laser beam diameter)이다. 렌즈 초점에서 빔반지름의 $\sqrt{2}$ 배가 되는 곳까지를 Rayleigh range라고 하며, Rayleigh range z_r 에서 빔의 반지름 $w(\pm z_r)$ 은 $w_0\sqrt{2}$ 와 같다. 이때 z_r 은 식 (1)로부터 다음의 식 (3)과 같다.

$$z_r = \frac{\pi w_0^2}{\lambda} = \left(\frac{4\lambda}{\pi}\right) \left(\frac{F}{D}\right)^2 \quad (3)$$

Fig. 2와 같이 Scheimpflug's 조건을 적용한 레이저와 카메라 배치에서 레이저선상의 측정선에서의 변위에 대한 영상선에서의 변위 사이의 관계는 식 (4)와 같다.

$$\begin{aligned} \delta &= \frac{d_i \sin \theta \Delta}{\Delta \sin(\theta + \phi) + d_o \lambda \phi} = \frac{D_2 \Delta}{\Delta + D_1} \\ &= D_2 \left(1 - \frac{D_1}{\Delta + D_1}\right) \\ D_1 &= \frac{d_o \sin \phi}{\sin(\theta + \phi)} \end{aligned}$$

$$D_2 = \frac{d_i \sin \theta}{\sin(\theta + \phi)} \quad (4)$$

식 (4)에서 보면 $\delta = D_2$ 와 $\Delta = -D_1$ 는 점근선을 나타낸다. 따라서 영상선에서의 변위 δ 를 $\delta = \lambda D_2$ ($\lambda < 1$)로 놓을 수 있다. 이때 $\Delta - \delta$ 곡선의 기울기 $S(\lambda)$ 는 식 (5)와 같다.

$$S(\lambda) = \frac{\partial \Delta}{\partial \delta} = \frac{1}{(1-\lambda)^2} \frac{D_1}{D_2} \quad (5)$$

d_o , d_i , F , θ , ϕ 등의 설계변수들이 정해지고, 카메라의 픽셀의 크기와 개수를 알고 있을 때, 위의 식 (4)로부터 측정구간을 알 수가 있고 식 (5)로부터 측정구간에서의 분해능을 구할 수 있다.

3. 센서설계

Scheimpflug's condition을 적용하면 측정구간의 전 영역에 걸쳐서 초점이 맞는 영상을 얻을 수가 있다. Fig. 4에서 설계변수들 중 렌즈에서 영상면까지의 거리 d_i 는 렌즈의 초점거리 F 와 렌즈에서 물체까지의 거리 d_o 가 결정되면 얇은 렌즈의 공식으로부터 자동적으로 정해지고, 평면거울의 중심인 스캐닝 축에서 측정면까지의 거리 l 과 분리각 θ 가 정해지면 스캐닝 축상에서의 레이저선과 광축(optical axis)사이의 거리 b 역시 결정이 되고, Scheimpflug's 조건을 적용하기 위한 영상면의 광

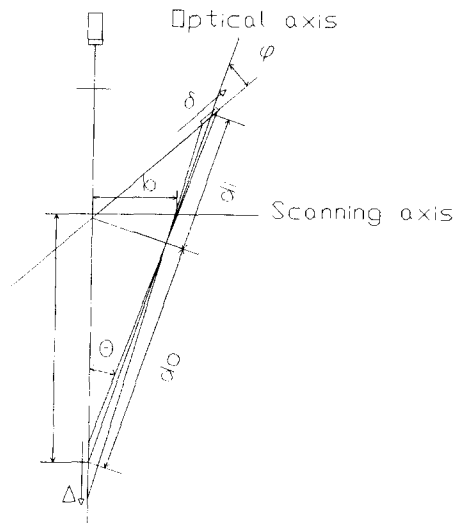


Fig. 4 Configuration of vision sensor using scanning beam

측에 대해 기울어진 각 ϕ 도 θ 와 d_o , F 로부터 결정이 된다. 센서를 설계할 때는 먼저 측정대상을 결정하고, 그에 따른 측정범위와 요구되는 분해능을 결정하고 측정면의 반사성질에 따라 레이저선과 광축사이의 분리각 θ 를 결정한 뒤 그에 따른 설계 변수들을 결정해 나간다. 본 연구에서는 측정범위와 분해능이 설계변수에 의해 어떻게 영향을 받는지를 시뮬레이션을 통해서 보이고 실제로 센서를

설계하여 용접부의 형상을 측정하는 알고리즘을 검증하였다.

3.1 깊이방향의 측정범위와 분해능

깊이방향의 측정범위와 분해능은 CCD 소자의 크기와 개수, 렌즈의 초점거리, 렌즈에서 측정면까지의 거리, 카메라와 레이저의 분리각 등에 의해서 결정이 된다. 식 (4)와 (5)로부터 측정범위와 분해

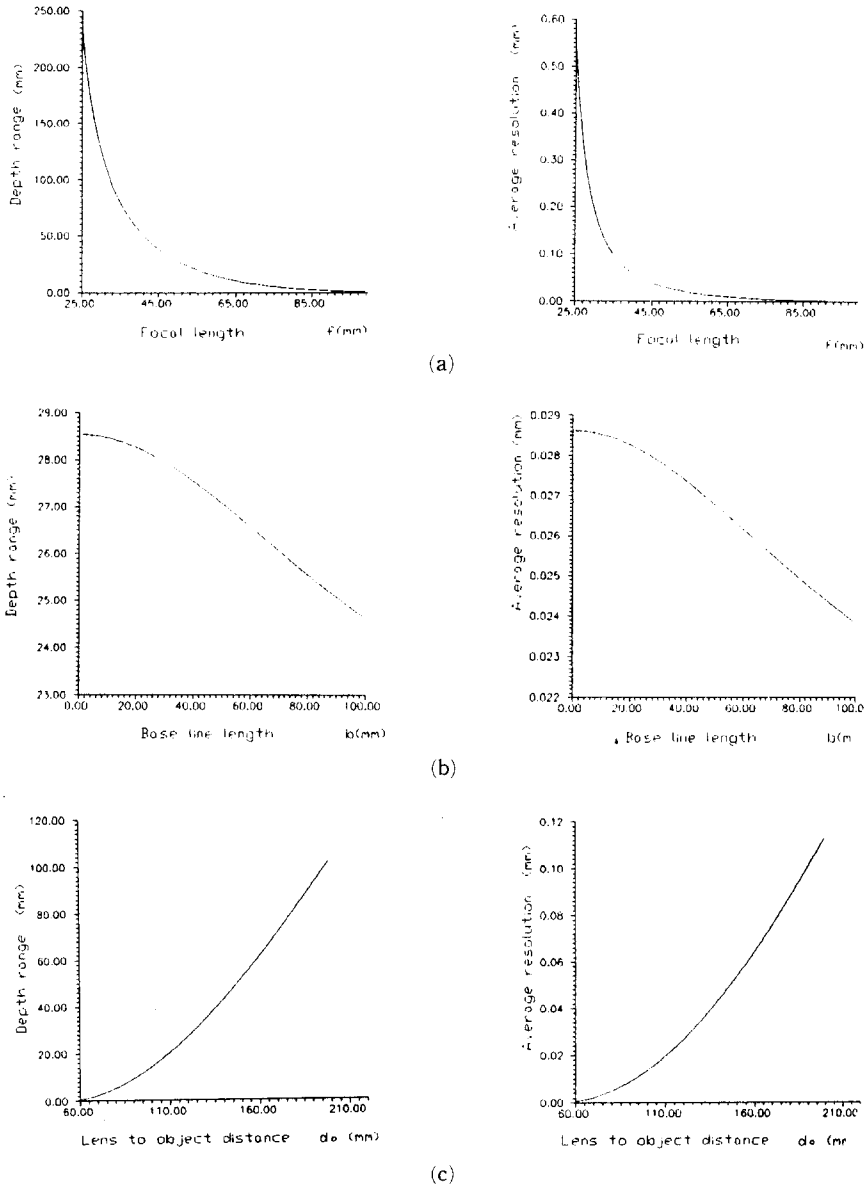


Fig. 5 Influence of sensor parameter to relations between image displacement and object displacement and between image displacement and resolution

Table 1 Property of focused laser spot

Focusing optics	Single lens (F=250 mm)	Beam expander (*5), single lens (F=250 mm)
ω_0 (mm)	0.029	0.006
z_r (mm)	15	0.6

Diode laser : $\lambda_c=690\text{nm}$, FWHM=10 nm, Beam diameter $D=3.8$ mm,
 Beam power $P(\infty)=20\text{mW}$ (Max.), Collimated source

능에 대한 설계변수들의 영향을 알아보기 위해서 여러 설계변수중 서로 독립적인 F 와 d_o , b 를 각각 변화시키면서 측정범위와 분해능의 변화를 시뮬레이션해 보았다. 시뮬레이션시 스캐닝 축에서 측정면까지의 거리 l 을 150 mm로 일정하게 하였다. 사용한 카메라의 CCD소자의 크기는 가로, 세로가 각각 $13\mu\text{m}$ 이고 소자의 개수는 1024개이다. Fig. 5 (a)는 d_o 와 b 를 각각 120 mm과 50 mm으로 고정시키고 렌즈의 촛점거리를 변화시키면서 그에 따른 측정범위와 분해능을 나타낸 것이다. 다른 설계변수들이 고정되어 있을 때, 렌즈의 촛점거리가 증가함에 따라 측정범위가 크게 감소하고, 분해능은 크게 증가한다. Fig. 5(b)는 F 와 d_o 를 각각 50.8 mm와 120 mm로 고정시키고 스캐닝 거울의 중심선에서 레이저선과 광축사이의 거리를 변화시키면서 측정범위와 분해능의 변화를 시뮬레이션한 것이다. b 가 증가함에 따라 측정범위가 미소하게 감소하는 것을 알 수 있다. Fig. 5(c)는 F 와 b 를 각각 50.8 mm와 50 mm로 고정시키고 렌즈에서 측정면까지의 거리를 변화시키면서 그에 따른 측정범위와 분해능의 변화를 시뮬레이션한 것이다. d_o 가 증가함에 따라 측정범위가 크게 증가하고, 분해능은 크게 감소한다.

센서의 분해능과 정확도는 사용하는 레이저 빔의 촛점크기와 촛점심도에도 영향을 받는다. 촛점에서 빔의 크기는 촛점심도의 제곱에 반비례하므로 측정범위에 맞게 촛점을 맞추어주는 광학기기를 선택한다. Table 1은 다이오드 레이저에 볼록렌즈만을 사용했을 경우와 볼록렌즈에 빔 확장기를 추가로 사용했을 경우의 촛점심도와 렌즈의 촛점에서의 가우시안 빔 반지름을 앞의 식 (1), (2)를 이용해서 구한 것이다.

3.2 측면방향의 측정범위와 분해능

측면방향의 측정범위와 분해능은 주사 기구의 주

사각과 주사 속도에 따라 결정이 된다. Fig. 4에서 스캐닝 거울의 중심에서 측정면까지의 거리 l 과 주사기구의 주사각에 의해서 측면방향의 측정범위를 결정해 줄 수 있고, 주사속도로 분해능을 결정해 줄 수 있다. 주사기구의 주사각을 β 로 놓으면 측면방향의 측정범위 F_L 은 식 (6)와 같이 결정되고, 초당 주사회수를 n 이라 하고, 초당 위치측정의 회수를 m 이라 하면 측면방향의 분해능 R_L 은 식 (7)와 같이 결정된다.

$$F_L = 2 / \sin\left(\frac{\beta}{2}\right) \tag{6}$$

$$R_L = F_L \frac{n}{m} \tag{7}$$

4. 주사빔을 이용한 시각센서의 제작 및 보정

4.1 센서제작

Fig. 6은 제작된 센서의 구성부품인 카메라와 갈바노미터, 레이저와 갈바노미터 컨트롤러, 영상처리보드 (DT 2856), 카메라 전원공급보드 (OVb7-LF), 범용 인터페이스 보드 (PCL-812),

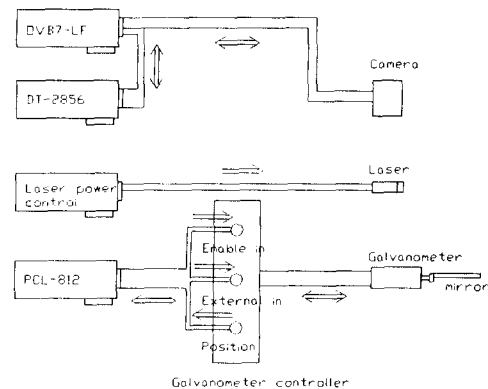


Fig. 6 Schematic configuration of sensor system

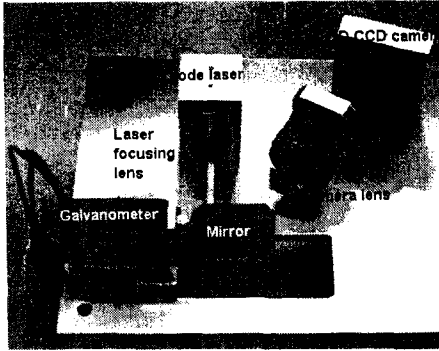


Fig. 7 Photograph of vision sensor

레이저 출력제어보드와 컴퓨터 사이의 연결을 도식한 것이다. Fig. 7은 제작된 주사빔을 이용한 시각 센서의 부품의 배치를 보여준다. 갈바노미터는 그림상의 위치에 고정되어 있고 레이저는 전후 이동이 가능하며 카메라 렌즈와 1 D 카메라는 분리되어서 자유로이 움직일 수 있도록 제작하였는데, 카메라, 렌즈, 레이저 및 평면거울은 모두 중심이 같은 평면상에 있다. Table 2는 제작된 센서의 설계 변수를 나타낸 것이고, Table 3은 측정범위와 분해능, 측정범위에서의 레이저 점의 크기를 나타낸 것이다.

4.2 센서보정

갈바노미터는 가해진 전압에 비례해서 주사각이 결정이 되고 위치센서에서의 전압신호는 주사각에 비례한다. 갈바노미터의 전압신호로부터 주사각을 알기 위해서 전압신호와 주사각 사이의 관계를 구하는 것이 필요하다. 또한 설계변수를 결정하고 센서를 제작하였을 때 부품들의 배치에는 배치상의 오차가 존재한다. 이러한 오차들 때문에 측정선에서의 측정점의 변위에 따른 영상선에서의 측정점의 변위 사이의 관계는 식 (4)와 같이 나타나지 않는다. 따라서 이 오차가 고려된 두 변위 사이의 관계를 구하는 것이 필요하다.

4.2.1 갈바노미터-레이저 보정

갈바노미터 위치센서의 전압신호는 주사각에 비례하므로 전압신호를 V_p 라 하고 주사각을 θ_s 라 할 때, 둘 사이의 관계는 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

Table 2 Variables of developed sensor

Design variable	Value
F [camera lens](mm)	50
d_o (mm)	153.6
d_i (mm)	74.1
b(mm)	40
l(mm)	120
θ (degree)	18.4
ϕ (degree)	34.6
F [laser focusing lens](mm)	250

Table 3 Table 3 specification of developed sensor

Depth of range (mm)	52
Average depth resolution (mm)	0.051
Min. spot dia. in the depth of range (mm)	0.06
Max. spot dia. in the depth of range (mm)	0.49

$$\theta_s = aV_p + b \quad (8)$$

위의 식의 계수 a , b 를 구하기 위해서 갈바노미터의 주사 축에서 198 mm 떨어진 곳에서 2.5° 간격으로 흑백을 표시한 표적지를 구성하고 레이저 빔을 그 위로 주사하면서 표적지에서의 흑백에 따른 영상신호의 차이를 이용하여 주사각과 이때의 위치센서의 전압신호를 측정하였다. 측정된 데이터로부터 최소 자승오차법을 이용해서 계수 a , b 를 구한 보정식이 식 (9)이다.

$$\theta_s = 5.1346 V_p + 0.5820 \quad (9)$$

4.2.2 카메라 보정

요구되는 측정범위와 분해능을 갖도록 카메라와 렌즈, 레이저를 배치하였을 때 실제로 부품들의 배치와 설계한 거리나 각도 사이에는 오차가 존재한다. Fig. 8에서 점선으로 나타낸 것은 배치상의 오차가 없을 경우를 나타낸 것이고 실선으로 나타낸 것은 배치상의 오차가 있을 경우를 나타낸 것이다. 배치상의 오차가 있을 때 오차가 없을 경우 배치상의 설계변수들에 의해 식 (4)와 같이 나타났던 Δ - δ 관계는 식 (10)으로 나타난다.

$$\Delta' - \Delta_0 = \frac{(d_o + (d_o)_{err}) \sin(\phi + \phi_{err}) (\delta' - \delta_0)}{(d_i + (d_i)_{err}) \sin(\theta + \theta_{err}) - (\delta' - \delta_0) \sin((\theta + \theta_{err}) + (\phi + \phi_{err}))} \quad (10)$$

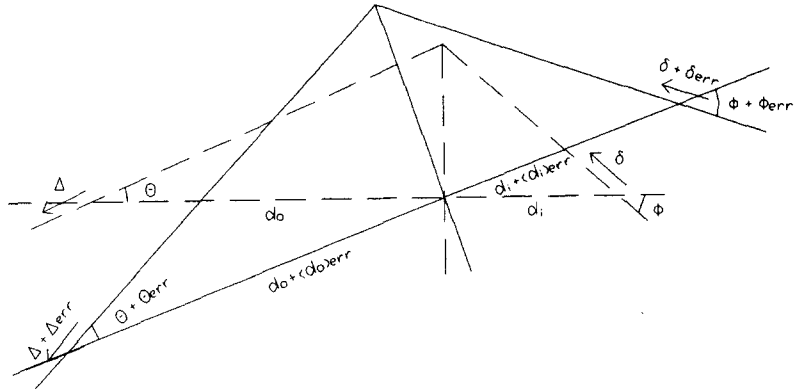


Fig. 8 Sensor geometry considering geometric errors

A' , δ' 는 임의로 원점을 A_0 , δ_0 로 잡았을 때 A_0 , δ_0 를 원점으로 하는 A 와 δ 축상의 좌표로, A' $= A + A_0$, $\delta' = \delta + \delta_0$ 으로 표현되고, A' 과 δ' 사이의 관계는 식 (11)과 같이 나타난다.

$$A' = \frac{(-a\delta_0 + (b+c\delta_0)A_0) + (a-cA_0)\delta'}{(b+c\delta_0) - c\delta} = \frac{1 + \alpha\delta'}{\beta + \gamma\delta'} \quad (11)$$

이때 세 점의 A' 와 δ' 정보를 알면 α , β , γ 를 구할 수가 있다. (A_1, δ_1) , (A_2, δ_2) , (A_3, δ_3) 에 대해서 α , β , γ 를 구해보면 다음 식(12a), (12b), (12c)과 같다.

$$\beta = \frac{\delta_2\delta_3(\delta_2 - \delta_1)(A_2 - A_3) - \delta_1\delta_2(\delta_3 - \delta_2)(A_1 - A_2)}{\delta_2\delta_3(A_1\delta_2 - A_2\delta_1)(A_2 - A_3) - \delta_1\delta_2(A_2\delta_3 - A_3\delta_2)(A_1 - A_2)} \quad (12a)$$

$$\gamma = \frac{(\delta_2 - \delta_1) - (A_1\delta_2 - A_2\delta_1)\beta}{\delta_1\delta_2(A_1 - A_2)} \quad (12b)$$

$$\alpha = \frac{A_1\beta + A_1\delta_1\gamma - 1}{\delta_1} \quad (12c)$$

식 (13)은 측정된 데이터를 이용해 위에서 구한 보정식을 써서 구한 $A' - \delta'$ 관계식이다.

$$A' = \frac{1 - 3.6072 \times 10^{-5} \delta'}{9.8241 \times 10^{-3} - 3.6121 \times 10^{-6} \delta'} \quad (13)$$

5. 시각센서의 적용

제작된 시각센서로 비 이음부(vee joint)와 맞대기 이음부(butt joint), 랩 이음부(lap joint)를 측정하였다.

가우시안 분포의 점형태의 레이저가 측정부에서 반사되어 카메라에 맺힌 영상은 그레이 레벨의 가우시안 분포를 갖는다. 무게중심법을 사용하여 추출한 레이저의 중심, x_m 은 다음의 식 (14)와 같이 나타난다.

$$x_m = \frac{\sum_0^{r-1} i \cdot I_i}{\sum_0^{r-1} I_i} \quad (14)$$

식 (14)에서 r 은 카메라의 CCD의 개수이고, I_i 는 i 번째 CCD에 맺힌 영상의 그레이 레벨이다. 추출된 레이저의 중심의 영상좌표와 갈바노미터의 위치센서에서의 신호로부터 측정부의 한 점의 위치 정보를 얻을 수가 있다. 주사기구에 의해서 측정부에 레이저빔이 주사되었을 때 얻어진 측정부의 정보는 영상좌표 δ' 과 갈바노미터 위치센서에서의 전압신호 V_p 인데 앞에서의 센서보정 결과식 식 (9)와 식 (13)에 대입하면 주사각 θ_s 와 A' 을 알 수 있다. 이때 측정대상의 실제 위치정보 x_j , z_j 는 다음 식 (15), (16)과 같다.

$$x_j = A'_j \sin(\theta_s)_j \quad (15)$$

$$z_j = A'_j \cos(\theta_s)_j \quad (16)$$

여기서, j 는 CCD 카메라의 j 번째 프레임으로부터 추출된 위치정보임을 나타낸다. Fig. 9는 센서로 측정된 대표적인 용접부의 형상인 비 이음부(vee joint), 맞대기 이음부(butt joint), 랩 이음부

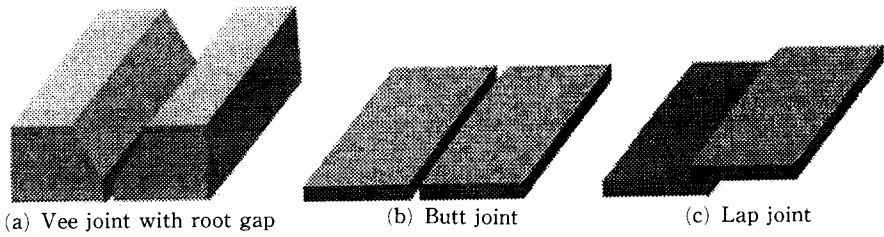


Fig. 9 Sensing objects

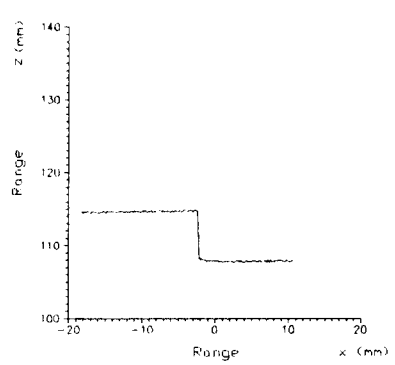
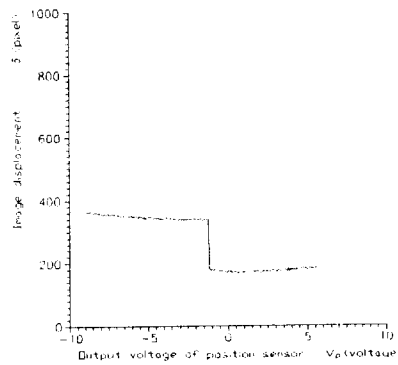
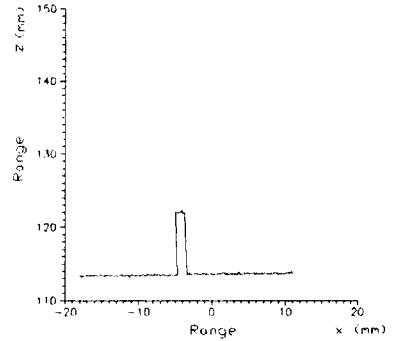
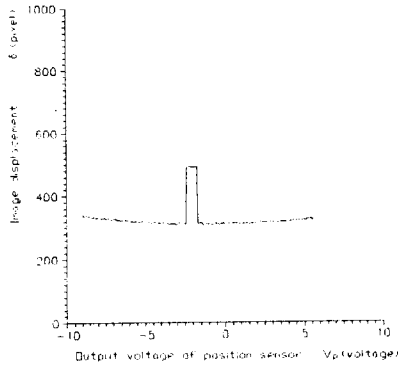
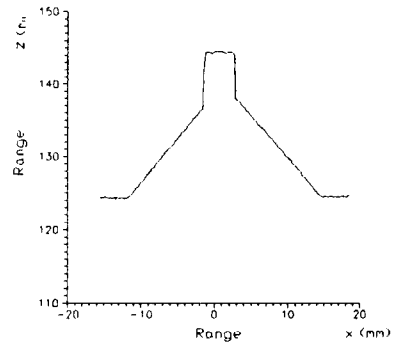
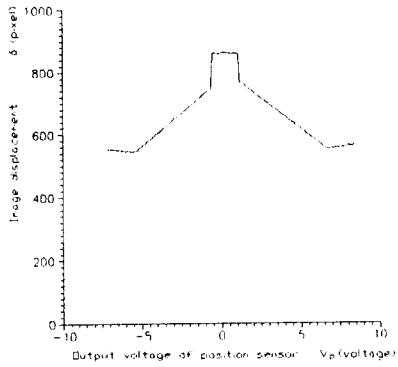


Fig. 10(a) Range image vs. position sensor signal from one complete scanning

Fig. 10(b) Calculated x, z range from range image and position sensor signal

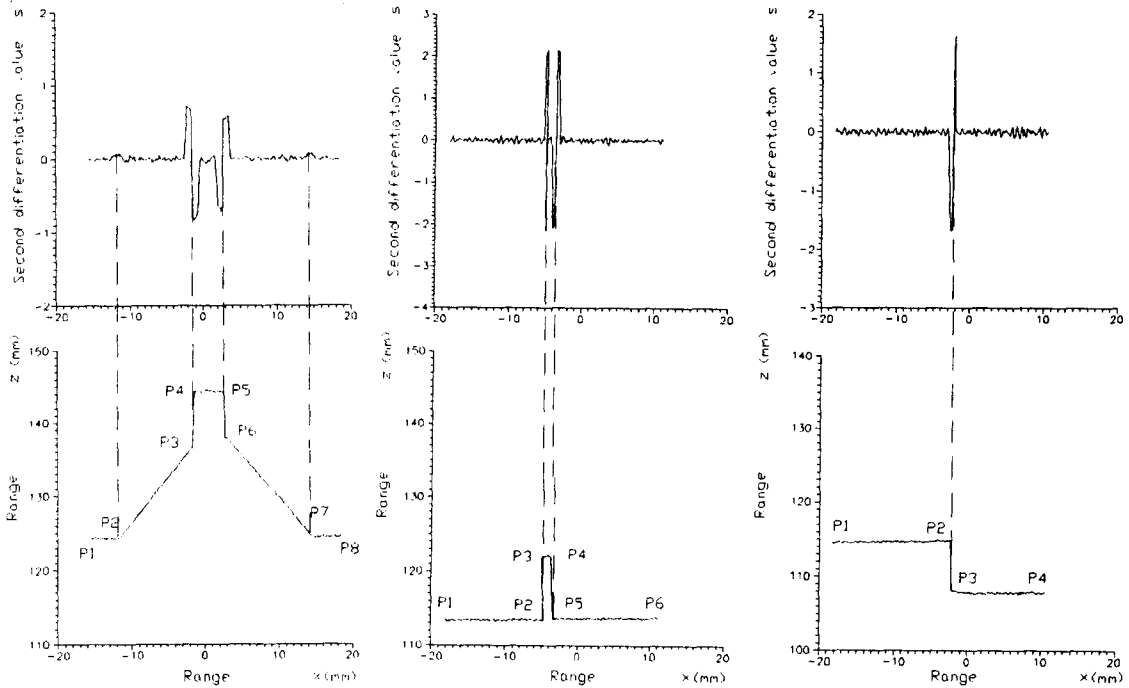


Fig. 11 Feature points extracted from second differentiation

(lap joint)를 보여준다. Fig. 10의 (a)는 센서의 측정신호인 카메라 영상면에서의 변위와 갈바노미터의 출력전압을 나타낸 그래프이고 (b)는 센서보정 결과식들을 이용해 구한 $x-z$ 형상좌표이다. 측정된 측정부의 형상좌표에서 특징점을 추출하기 위해서 z 를 식 (17)과 같이 이차미분하여서, 이차미분값 s_j 를 이용해 측정부의 특징점들을 추출하였다.

$$s_j = \frac{z_{(j+k)} + z_{(j-k)} - z_j}{2k} \quad (17)$$

여기서, k 는 이차미분시 중심값과 앞뒤의 값 사이의 간격을 나타내는 계수로 Fig. 11은 세 가지 이음부에 대해서 s_j 를 구하고, 이 값으로부터 특징점들을 추출해 그래프상에 표시한 것이다. 세 가지 대표적인 이음부 형상에 대해서 개발된 시각센서는 특징점들을 잘 나타내고 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

용접공정에 주사빔을 이용한 시각센서를 적용하여 용접선의 위치와 용접부의 형상을 측정함으로써 용접선 추적과 용접부의 형상에 따른 용접변수 제

어를 실현할 수 있다. 주사빔을 이용한 시각센서의 제작시 Scheimpflug's 조건을 적용할 경우, 전체 측정범위에서 초점이 맞는 영상을 얻을 수가 있으므로 초점심도를 깊게 해주기 위해 렌즈의 유효구경을 작게 해 줄 필요가 없다. 따라서 광량의 손실이 없고 측정범위 전체에서 비초점화로 인한 분해능의 손실이 없다.

집광렌즈나 빔확장기와 같은 광학기기를 사용하여서 레이저 빔을 집광하였을 때 센서의 분해능이나 정밀도에 영향을 미치는, 측정범위에서의 레이저 빔의 단면의 크기를 구할 수 있도록 빔의 단면의 크기와 초점심도를 구하였고, 시각센서를 설계할 때 센서부품 사이의 배치에 따른 측정범위와 분해능을 예측하기 위해서 센서의 측정면에서의 변위와 영상면에서의 변위사이의 관계를 수식화하였다. 이렇게 수식화된 결과를 이용하여 요구되는 측정범위와 분해능을 가진 센서를 설계하는 방법을 제시하였고 직접 센서를 제작하고 제작된 센서의 보정기법을 제시하였다. 센서의 보정은 갈바노미터-레이저 보정과 카메라 보정으로 나누어서 실행하였다. 제작된 시각센서를 이용해 여러 조인트를 측정 대상으로 했을 때 카메라로부터의 영상신호와 갈바

노미터의 위치신호로부터 최종적으로 필요한 형상 정보를 추출해내기 위한 알고리즘을 제시하였다.

참고문헌

- (1) Agapakis, J. E., Katz, J. M., Koifman, M., Epstein, G. N., Fridman, J. M., Eyring, D. O. and Rutishauser, H. J., 1986, "Joint Tracking and Adaptive Robotic Welding Using Vision Sensing of the Weld Joint Geometry," *Welding Journal*, Vol. 65, No. 11, pp. 33~41.
- (2) Richardson, R. W., 1986, "Robotic Weld Joint Tracking Systems-Theory and Implementation Methods," *Welding Journal*, Vol. 65, No. 11, pp. 43~51.
- (3) Verbeek, W. J. P. A., Beckmann, L. J. H. J., and Oomen, G. L., 1985, "Control Strategy for an Arc-Welding Robot under Sensory Guidance," *Proc. of the 5th Intern. Conf. on Robot Vision and Sensory Controls*, pp. 541~550.
- (4) Oomen, G. L. and Verbeek, W. J. P. A., 1983, "A Real-Time Optical Profile Sensor for Robot Arc Welding," *Proc. of the Third intern. Conf on Robot Vision and Sensory Controls*, Boston, November, pp. 659~668.
- (5) Bickel, G., Häusler G. and Maul, M., 1985, "Triangulation with Expanded Range of Depth," *Optical Engineering*, Vol. 24, No. 6, November/December, pp. 975~977.
- (6) Rioux, M., Bechthold, G. H., Tayler, D. G. and Duggan, M. D., 1987, "Design of a Large Depth of View Three-Dimensional Camera for Robot vision," *Optical Engineering*, Vol. 26, No. 12, December, pp. 1245~1250.
- (7) 이철원, 1994, "높이 변화가 있는 직선용접부의 자동용접을 위한 시각센서에 관한 연구," 석사학위논문 한국과학기술원.
- (8) 유원상, 1995, "용접 자동화를 위한 주사빔을 이용한 시각센서에 관한 연구," 석사학위논문 한국과학기술원.