

용접접합부의 형상계측을 위한 주사형 시각센서의 설계에 관한 연구

배 강 열*

*진주산업대학교 메카트로닉스공학과

A Study on Design of Visual Sensor Using Scanning Beam for Shape Recognition of Weld Joint

Kang-Yul Bae*

*Dept. of Mechatronics Engineering, Jinju National University, Jinju 660-758, Korea

Abstract

A visual sensor consisted of polygonal mirror, laser, and CCD camera was proposed to measure the distance to the weld joint for recognizing the joint shape. To scan the laser beam of the sensor onto an object, 8-facet polygonal mirror was used as the rotating mirror. By locating the laser and the camera at axi-symmetrical positions around the mirror, the synchronized-scan condition could be satisfied even when the mirror was set to rotate through one direction continuously, which could remove the inertia effect of the conventional oscillating-mirror methods. The mathematical modelling of the proposed sensor with the optical triangulation method made it possible to derive the relation between the position of an image on the camera and the one of a laser light on the object. Through the geometrical simulation of the proposed sensor with the principal of reflection and virtual image, the optical path of a laser light could be predicted. The position and direction of the CCD camera were determined based on the Scheimpflug's condition to fit the focus of any image reflected from an object within the field of view. The results of modelling and simulation revealed that the proposed visual sensor could be used to recognize the weld joint and its vicinity located within the range of the field of view and the resolution.

(Received February 19, 2003)

Key Words : Visual sensor, Optical triangulation, Polygonal mirror, Laser scan, CCD camera

1. 서 론

생산공정의 자동화정도를 제고하고 유연성을 도모하기 위하여, 공정의 현황을 각종의 센서를 활용하여 실시간으로 검지하고 결과를 제어데이터로 활용하는 기법이 범용화 되어 있다. 용접공정에서도 분야에 따라 가공 소재의 형상 및 크기, 토치와 소재 사이의 거리 등을 실시간으로 계측함으로써 자동화정도를 크게 향상할 수 있다. 이는, 계측된 정보를 이용하여, 공정의 제어기가 소재의 상태변화 등에 적응하여, 적절한 용접경로와 용접조건을 자동산출하고 재설정할 수 있기에 가능하다. 특히 용접공정의 자동화분야에서 토치와 소재 사이의 거리를 계측하여 용접 접합부를 인식하는 방법으로 시각센서(visual sensor)의 활용이 점진적으로 확

대되고 있다. 시각센서 활용은 가격의 면에서는 다소 비경제적 방법이나, 적용용도에 따라서 비접촉의 특성, 측정정도의 우수성 등이 크게 부각된다. 용접접합부까지의 거리 계측용 시각센서는 주로 레이저와 카메라로 구성되어, 레이저에서 접합부에 주사한 레이저광의 이미지를 카메라에서 촬영하는 방식으로, 이들의 기하학적 구성에 광삼각법(optical triangulation)의 원리를 적용하여 접합부까지의 거리를 산출하게 된다^{1,2)}. 여기서 레이저에서 접합부에 광을 주사하는 방법은 실린더형 렌즈를 이용하여 구조화된 광을 접합부에 형성하는 경우와 회전거울을 이용하여 광을 접합부에 주사하여 주사광(scanning light)을 형성하는 경우로 대별할 수 있다¹⁾. 구성이 용이한 구조화된 광(structured light)을 적용하는 경우에는 레이저의 강도가 낮고 손실이 많아, 표면의 반사상태에 따라 카메라에서 획득되는 레이

저 이미지의 상태가 불량할 수 있는 단점이 있다²⁾. 레이저 강도와 동일한 광의 연속된 집합인 주사광을 이용하는 경우는 위의 단점을 크게 보완할 수 있고, 자동동기방식을 적용하여 시야거리를 크게 할 수 있는 장점이 있어, 이를 이용한 시각센서의 개발과 적용이 증가하고 있다³⁾. 주사광은 갈바노미터(galvanometer)에 의해 회전되는 거울로써 레이저광의 경로를 주기적으로 변화하여 얻어지게 됨으로, 갈바노미터의 회전정도와 카메라에서 얻어지는 레이저 이미지의 대응관계를 산출할 수 있어야 한다. 현재 보고된 주사방식은 진동형 회전 방식에 기반을 두고 갈바노미터를 회전시키는 방식으로, 이는 회전이 반전되는 정점에서의 관성효과가 문제가 된다^{4,5)}. 그러나 이와 같은 문제를 해결하기 위한 센서의 제안과 설계과정을 제시한 문헌을 찾기 어려운 실정이다.

본 연구에서는 용접접합부의 형상을 측정하기 위한 센서로서, 갈바노미터의 회전을 정역으로 변환하는 방식을 대신하여 한 방향으로만 회전하게 하고 팔각거울(8-facet mirror)로 주사광을 형성하는 시각센서의 구조를 제안하여, 수학적 모델링과 광삼각법을 이용하여 레이저위치, 렌즈위치, 카메라위치, 갈바노미터의 회전각도 등의 설계변수와 카메라에 획득된 상의 위치와의 대응관계를 유도하고, 폭 및 깊이 방향의 시야거리, 분해능 등을 산출하고자 하였다. 제안된 시각센서에서 레이저광의 주사경로와 주사된 광의 입사경로 및 상의 형성위치 등을 가상의 레이저 및 렌즈기법과 반사변환을 이용한 시뮬레이션을 통해 분석하여 주사방식 시각센서로서의 적합성을 검증하고자 하였다.

2. 시각센서 구조 및 모델링

2.1 시각센서 구조

거리 및 형상계측을 위해 Fig. 1과 같이 반도체레이저, 1차원 CCD 카메라 및 렌즈, 팔각의 회전거울(rotating mirror), 좌우의 고정거울(fixed mirror)로 구성된 시각센서를 제안하였다. 팔각거울의 회전에 의해서도 레이저 주사와 광의 입사가 동일한 방향과 크기로 결정되는 동기(synchronized)조건을 자동적으로 얻기 위해, 레이저 주사위치와 렌즈위치를 그림과 같이 서로 팔각거울의 축대칭(axi-symmetry) 위치에 두었다. 레이저에서 광을 발생하고 팔각의 회전거울에서 광의 방향을 주기적으로 변경시키게 되면, 좌측의 고정거울에서 반사된 광은 계측코자하는 물체의 좌우로 주사(scan)를 하게 된다. 물체 위에서 반사된 레이저광은 우측 고정거울에서 반사되고, 회전거울에서 주사방향과

동기화(synchronization)되어 경로가 설정된다. 회전 거울에서 반사된 광은 대물렌즈를 통해 1차원 CCD 카메라에 집광되어 상으로 맺히게 된다. 상이 형성되는 위치는 센서에서 목표물체까지의 높이에 대응하여 변화하게 된다. 한편 광삼각법을 이용하면, 레이저광의 상이 형성된 CCD의 위치와 레이저가 주사된 물체까지의 절대위치의 관계를 유도할 수 있다. 이때 주사각 θ 의 위치는 회전거울에 부착된 모터의 엔코더에서 계측할 수 있어, 모델링 과정에서는 주어진 값으로 간주할 수 있다. Fig. 1에서 s 는 회전거울의 중심에서 각 거울이 x 축과 교차하는 위치까지의 거리, α 는 고정거울의 경사각, R 은 회전거울 중심에서 회전거울면이 만나는 위치까지의 거리를 각각 나타낸다.

2.2 시각센서 모델링

시각센서의 모델링은 CCD 카메라에서 광의 상(image)위치(p')와 절대(world) 좌표계에 광이 주사된 위치(x, y)와의 관계를 수학적으로 유도하는 과정이다. 이를 위해 가상의 렌즈위치에 원점을 둔 XY 좌표계와 X 축과 δ 의 각도로 경사진 CCD카메라의 좌표계를 Fig. 2와 같이 정의하였다. Fig. 2에서 광과 상과의 관계에서 광이 놓인 위치, 즉 계측점을 구하기 위해, 우선 초점거리 f 인 카메라에 물체거리 l 에 대응하여 상이 맺히는 거리(u)를 다음의 식 (1)에서 구한다.

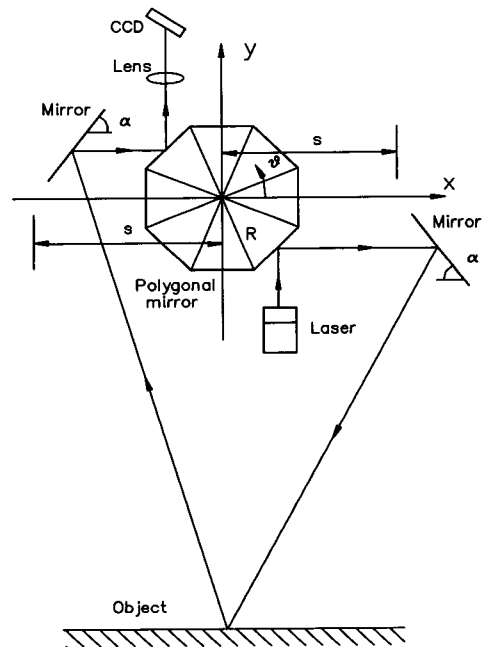


Fig. 1 Schematic configuration of proposed visual sensor and its sensing mechanism

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{l} + \frac{1}{u} \text{ 이므로, } u = -\frac{f \cdot l}{l-f} \quad (1)$$

그림에서 보인 변수를 $v = u \cdot \cos \beta$, $\xi = \tan^{-1}(d/2l)$, $\beta = \tan^{-1}(\frac{u}{l \cdot \tan \xi})$, $\delta = \beta - \xi$ 로 각각 정의하고, 가상의 렌즈(Lx'', Ly'')⁶⁾에 위치한 좌표계(X, Y)에서의 관측한 임의의 계측점(X, Y)과 CCD에 투사된 상의 위치(p)와의 관계식을 다음의 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{X}{Y} = \frac{-(p-v \cdot \tan \delta) \cos \delta}{\frac{v}{\cos \delta} + (p-v \cdot \tan \delta) \sin \delta} \quad (2)$$

한편, $\frac{Y}{X-d} = \tan(-(\theta_0 - \theta))$ 이고, 여기서 $\tan \theta_0 = -\frac{2l}{d}$ 로, 이를 식(2)에 대입하여 정리하면 (X, Y)는 다음과 같이 구해진다.

$$X = \frac{-(p-v \cdot \tan \delta) \cos \delta \cdot (2l+d \cdot \tan \theta)d}{-(p-v \cdot \tan \delta) \cos \delta \cdot (2l+d \cdot \tan \theta) - (\frac{v}{\cos \delta} + (p-v \cdot \tan \delta) \sin \delta) \cdot (d-2l \cdot \tan \theta)} \quad (3)$$

$$Y = \frac{(\frac{v}{\cos \delta} + (p-v \cdot \tan \delta) \sin \delta) \cdot (2l+d \cdot \tan \theta)d}{-(p-v \cdot \tan \delta) \cos \delta \cdot (2l+d \cdot \tan \theta) - (\frac{v}{\cos \delta} + (p-v \cdot \tan \delta) \sin \delta) \cdot (d-2l \cdot \tan \theta)} \quad (4)$$

Fig. 2는 또한 고정된 거울을 이용한 광학삼각법의 원리와 자동동기 방식을 동시에 보여주는 것으로, 고정된 거울에서는 상이 맺히는 위치가 p이나 자동동기가 가능한 회전거울에서는 거울의 회전에 의한 주사각도(θ)와 동기하여 카메라에서의 상도 p' 위치로 각도 θ 만큼 이동됨을 보이고 있다. 이와 같은 상의 이동은 자동동기방식의 장점으로, 이로 인해 시야범위(field of view)를 넓힐 수 있고, 분해능(resolution)을 개선할 수 있다⁷⁾. 자동동기된 상의 위치(p')는 다음과 같이 고정 상 위치(p)로부터 구해질 수 있다.

$$\tan \phi = \frac{(p-v \cdot \tan \delta) \cos \delta}{\frac{v}{\cos \delta} + (p-v \cdot \tan \delta) \sin \delta} \quad (5.a)$$

$$\tan(\phi - \theta) = \frac{(p'-v \cdot \tan \delta) \cos \delta}{\frac{v}{\cos \delta} + (p'-v \cdot \tan \delta) \sin \delta} \quad (5.b)$$

여기서, δ 는 X축과 P축의 사이 각도이다. 식 (5.a)와 식 (5.b)에서 p'와 p의 관계를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$p = \frac{-v' + v' \sin \delta + v' \tan \theta \cdot \cos \delta - Av' \cos \delta - Av' \tan \theta + Av' \tan \theta \cdot \sin \delta}{\sin \delta + \tan \theta \cdot \cos \delta - A \cos \delta + A \tan \theta \cdot \sin \delta} \quad (6)$$

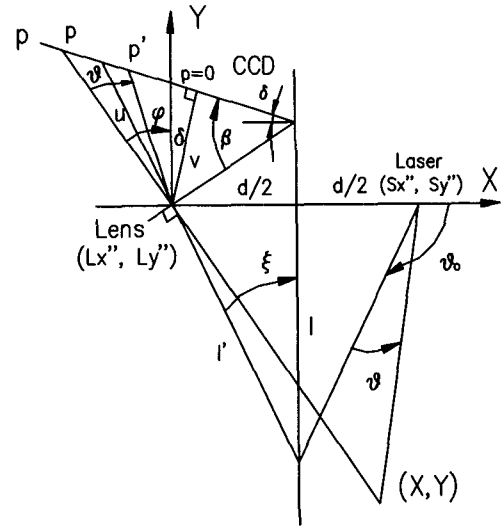


Fig. 2 Conventional and synchronized-scanning optical triangulation geometries

여기서, $v' = v/\cos \delta$, $v'' = v \cdot \tan \delta$, $A = [v' + (p' - v'') \sin \delta] \cdot [(p' - v'') \cos \delta]^{-1}$ 이다.

식 (3), (4)에서 구한 계측점의 위치를 카메라 상에 놓인 절대좌표계의 위치로 변환하면, 물체상에 놓인 계측점의 절대위치(x, y)는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$x = X - |Lx''| \quad y = Y + |Ly''| \quad (7)$$

이를 정리하면, 주사위치에서 주사각(θ)을 알고 CCD 카메라에서 상의 위치를 알게 되면, 식(6)에서 상의 위치(p')로부터 p를 산출하고, 이를 식(3), 식(4), 식(7)에 차례로 대입하여 절대위치(x, y)를 구할 수 있다.

한편, 본 연구에서 제안된 센서구조에서, 레이저 발생원(laser source)에서 출발된 레이저광이 각 거울요소 반사되는 위치 혹은 상이 맺혀지는 위치를 고려하여, 가상의 레이저 주사위치(Sx'', Sy'')와 가상의 렌즈 위치(Lx'', Ly'')를 기하학적으로 구할 수 있다. 이에 더하여 레이저광이 주사되고 반사되는 궤적을 구할 수 있게 된다. 이로써 각 광학요소의 크기, 각 요소간의 거리, 시야범위, 분해능 등이 계산

될 수 있어, 시각센서의 실제적 설계가 가능하게 된다.

(1) 레이저 발생원의 가상위치

Fig. 3에서 레이저 발생위치를 (S_x, S_y)라고 정의하면, ($R\cos(\theta_0/2)\sin\theta_0, S_y$)는 최초의 레이저광의 위치가 된다. 레이저광이 회전거울면에 반사되어 나갈 때 거울면 안쪽에 가상의 레이저발생원의 위치(x', y')를 구하면 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다⁸⁾.

$$\begin{aligned} H_x &= R\cos(\theta_0/2)\cos(\theta_0 - \theta), \\ H_y &= -R\cos(\theta_0/2)\sin(\theta_0 - \theta) \\ \gamma &= \theta_0 + \theta, \quad P_x = 2H_x, \quad P_y = 2H_y \\ [x' \ y' \ 1] &= [S_x \ S_y \ 1] \begin{bmatrix} c2\gamma & s2\gamma & 0 \\ s2\gamma & -c2\gamma & 0 \\ P_x & P_y & 1 \end{bmatrix} \quad (8) \end{aligned}$$

여기서, H_x, H_y 는 거울면의 직선과 거울중심에서 거울면에 내린 수직선의 교차점, R 은 팔각형 거울의 원점에서 모서리까지의 길이, P_x, P_y 는 반사변환시에 원점의 이동위치, θ_0 는 팔각거울의 각 거울면 대응각, θ 는 거울의 회전각, $c2\gamma = \cos 2\gamma$, $s2\gamma = \sin 2\gamma$ 이다.

(x', y')위치에서의 레이저광이 우측고정거울에 반사되어 나갈 때, 거울 속의 가상의 레이저 발생원의 위치(x'', y'')는 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} H_x' &= \frac{s}{2}(1 - c2a), \quad H_y' = \frac{s}{2}s2a, \\ a &= 180^\circ - a', \quad c2a' = c2a, \quad s2a' = -s2a \\ [x'' \ y'' \ 1] &= [x' \ y' \ 1] \begin{bmatrix} c2a' & s2a' & 0 \\ s2a' & -c2a' & 0 \\ P_x' & P_y' & 1 \end{bmatrix} \quad (9) \end{aligned}$$

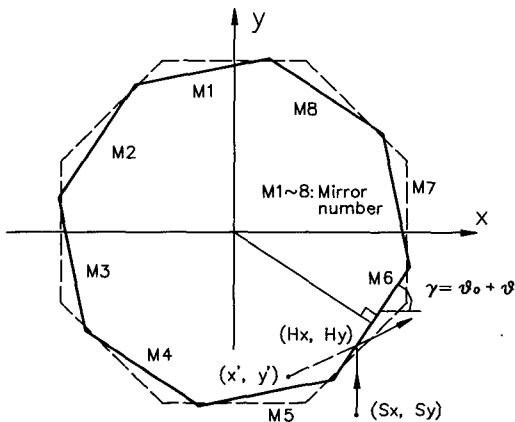


Fig. 3 Position and direction changes of reflecting facets with rotation of polygonal mirror

여기서, H_x', H_y' 는 고정거울이 지나가는 위치로 원점에서 수직거리, s 는 원점에서 좌측고정거울까지의 x 방향거리, a' 는 좌측 고정거울의 경사각이다. P_x', P_y' 는 변환시에 원점의 이동위치이고 다음과 같이 나타낸다.

$$P_x' = s(1 - c2a), \quad P_y' = s \cdot \sin 2a \quad (10)$$

따라서 최초의 레이저광의 위치는 좌측고정거울내의 가상의 지점(S_x'', S_y'')에 위치하는 것으로, 식 (11)과 같이 모델링될 수 있다.

$$\begin{aligned} [S_x'' \ S_y'' \ 1] &= [S_x \ S_y \ 1] \\ &\begin{bmatrix} c2(\gamma - a') & -s2(\gamma - a') & 0 \\ s2(\gamma - a') & c2(\gamma - a') & 0 \\ K_x & K_y & 1 \end{bmatrix} \quad (11) \end{aligned}$$

여기서, $K_x = 2H_x c2a - 2H_y s2a + P_x'$,

$K_y = -2H_x s2a - 2H_y c2a + P_y'$ 이다.

이를 정리하면 가상의 레이저 발생원 위치(S_x'', S_y'')는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} S_x'' &= S_x c2(\gamma - a') + S_y s2(\gamma - a') + K_x \\ S_y'' &= -S_x s2(\gamma - a') + S_y c2(\gamma - a') + K_y \quad (12) \end{aligned}$$

한편, 레이저경로의 방정식은 다음 식 (13)과 같이 나타낼 수 있다.

$$y - S_y'' = (x - S_x'') \tan \delta \quad (13)$$

여기서, $\tan \delta = -\tan 2(a + \theta)$ 이다.

(2) 렌즈의 가상위치

센서에서 렌즈의 위치(L_x, L_y)는 $L_x = -R\cos(\theta_0/2)\sin\theta_0$, $L_y = L_y$ 이고, 카메라로 투광되는 모든 반사광은 (L_x, L_y)의 위치를 통하여 CCD에 상을 맺는다. (L_x, L_y)를 통과하는 상의 회전거울내 가상의 위치(x', y')는 다음 식 (14)로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} H_x &= -R\cos(\theta_0/2)\cos(\theta_0 - \theta), \\ H_y &= R\cos(\theta_0/2)\sin(\theta_0 - \theta), \\ \gamma &= \theta_0 + \theta \\ [x' \ y' \ 1] &= [L_x \ L_y \ 1] \begin{bmatrix} c2\gamma & s2\gamma & 0 \\ s2\gamma & -c2\gamma & 0 \\ 2H_x & 2H_y & 1 \end{bmatrix} \quad (14) \end{aligned}$$

(x', y') 의 위치에 상을 발생하는 우측고정거울 내의 가상의 위치 (x'', y'') 는 식 (15)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} H_x' &= -\frac{s}{2}(1 - c2a), \\ H_y' &= \frac{s}{2} \sin 2a, \quad a' = a, \\ P_x' &= -s(1 - c2a), \\ P_y' &= s(\sin 2a) \end{aligned}$$

$$[x'' \ y'' \ 1] = [x' \ y' \ 1] \begin{bmatrix} c2a & s2a & 0 \\ s2a & -c2a & 0 \\ P_x' & P_y' & 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

여기서, α 는 우측고정거울의 경사각이고, (P_x', P_y') 는 변환시 원점의 이동위치이다.

카메라의 렌즈 중심위치에서 시야범위 내의 모든 상에 모아지게 되므로, 피측정물체에서 여러 각도로 반사되는 레이저광 중의 특정각도 반사광을 카메라는 수광하게 될 것이다. 즉 렌즈의 중심위치로 광이 수광되는 직선경로를 찾음으로써, 물체에서 반사되는 레이저광의 특정 반사각을 결정할 수 있다. 따라서 (L_x, L_y) 에서의 상은 가상의 (L_x'', L_y'') 에서 수광하는 것으로 가정할 수 있다.

$$[L_x'' \ L_y'' \ 1] = [L_x \ L_y \ 1]$$

$$\begin{bmatrix} c2(\gamma - a) & -s2(\gamma - a) & 0 \\ s2(\gamma - a) & c2(\gamma - a) & 0 \\ K_x & K_y & 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

여기서, $K_x = 2 H_x c2a + 2 H_y s2a + P_x'$,

$K_y = 2 H_x s2a - 2 H_y c2a + P_y'$ 이다.

이를 정리하면 가상의 렌즈위치 (L_x'', L_y'') 는 다음 식 (17)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} L_x'' &= L_x c2(\gamma - a) + L_y s2(\gamma - a) + K_x \\ L_y'' &= -L_x s2(\gamma - a) + L_y c2(\gamma - a) + K_y \end{aligned} \quad (17)$$

한편, 가상의 레이저 발생원과 렌즈간의 거리(d)는 다음과 같이 구할 수 있다. 레이저광의 방정식에서 절대위치 y 가 $L_y'' = -L_x s2(\gamma - a) + L_y c2(\gamma - a) + K_y$ 일 때, 레이저 경로의 위치 x 는 $B_x = -(L_y'' - S_y'')/\tan 2\alpha + S_x''$ 이므로, 가상의 레이저 발생원과 렌즈 위치간의 x방향거리는 $d = B_x - L_x''$ 로 구해질 수 있다. 여기서 가상의 광학중심과 측정점까지의 거리(l)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$l = -\frac{d}{2} \tan 2\alpha \quad (18)$$

여기서 구한 d 및 l을 식 (3)과 (4)에서 이용함으로써, 측정점의 위치(x, y)를 구할 수 있게 된다.

x 및 y방향의 분해능은 CCD 상의 위치이동에 따른 절대좌표의 미분값으로 정의되어, 다음 식 (19)와 같이 각각 나타낼 수 있고, 부록에 계산과정을 전개하여 두었다.

$$\left. \frac{dx}{db'} \right|_{b',o}, \left. \frac{dy}{db'} \right|_{b',o} \quad (19)$$

3. 시각센서 시뮬레이션

시각센서의 측정기구를 규명하고 모델링 결과를 검증하기 위해, 레이저광의 경로를 구하여 시각적으로 나타내고자 하였다. 가상의 레이저위치, 가상의 렌즈위치의 설정과 거울의 반사법칙 등을 이용하여 레이저 경로의 방정식을 구하고, 거울의 방정식과 함께 광과 거울이 만나는 점을 구하여 광 경로의 변경지점을 도출하였다.

Fig. 3에서 나타낸 바와 같이, 레이저 발생원에서 초기에 $S_x = R \cos(\theta_0/2) \sin \theta_0$ 에서 y축과 나란한 레이저광이 팔각거울의 6번 거울(M6)까지 직진할 때의 경로는, 거울면 M6이 두 점 $(R \sin(\theta_0/2 + \theta), -R \cos(\theta_0/2 + \theta))$, $(R \sin(\theta_0/2 - \theta), -R \sin(\theta_0/2 - \theta))$ 을 지나는 직선이므로, 교차위치 (P_x2, P_y2) 를 구하여 결정할 수 있다. M6에서 좌측고정거울(MF1)까지의 경로는, 가상의 레이저 위치 (x', y') 와 (P_x2, P_y2) 를 지나는 직선의 식과 좌측고정거울면의 방정식 $(MF1 = -\tan \alpha x + s \tan \alpha)$ 과의 교차점 (P_x3, P_y3) 를 구하여 결정하며, 교차점이 고정거울면에서의 반사위치가 된다. MF1에서 피측정 물체까지의 경로는, 가상의 레이저 위치 (S_x'', S_y'') 와 (P_x3, P_y3) 을 지나는 직선의 방정식과 P_y4 위치에 놓인 피측정 물체방정식의 교차위치 (P_x4, P_y4) 를 구하여 결정한다. 교차위치가 피측정 물체에서의 레이저광의 반사위치가 된다.

카메라의 렌즈 중심위치에서 시야범위 내의 모든 상에 모아지게 되므로, 피측정 물체에서 여러 각도로 반사되는 레이저광의 특정각도 반사광을 수광할 것이다. 즉 렌즈의 중심위치로 광이 수광되는 직선경로를 찾음으로써, 모재에서 반사되는 레이저광의 특정 반사각을 결정할 수 있다. 피측정 물체에서 우측고정거울(MF2)까지의 경로는, 가상의 렌즈위치 (L_x'', L_y'') 와 피측정 위치 (P_x4, P_y4) 를 잇는 직선의 방정식과 우측고정

거울의 방정식 ($MF2 = \tan \alpha x + s \tan \alpha$)과의 교차점 ($Px5, Py5$)을 구하여 결정하고, 교차점이 고정거울에서 레이저가 반사되는 위치가 된다. MF2에서 팔각회전거울의 M2면까지의 경로는, 우선 물체에 반사되는 점($Px4, Py4$)의 거울내 가상위치($Px4', Py4'$)를 구하여, 점($Px4', Py4'$)와 점($Px5, Py5$)을 잇는 직선의 식으로 결정된다.

$$[Px4' \ Py4' \ 1] = [Px4 \ Py4 \ 1] \begin{bmatrix} c2\alpha & s2\alpha & 0 \\ s2\alpha & -c2\alpha & 0 \\ -s(1-c2\alpha) & s(s2\alpha) & 1 \end{bmatrix} \quad (20)$$

M2면은 두 점 ($-R\sin(\theta_0/2 + \theta), R\cos(\theta_0/2 + \theta)$), ($-R\cos(\theta_0/2 - \theta), R\sin(\theta_0/2 - \theta)$)을 지나는 직선의 식으로 정해지고, 위에서 구한 고정거울에서 반사되는 광의 경로 직선식과의 교차위치 ($Px6, Py6$)를 구하면, 회전거울에서 레이저의 반사위치가 결정된다. M2에서 렌즈까지의 경로는, 렌즈중심이 점(Lx, Ly)에 위치해 있으므로, 점($Px6, Py6$)에서 (Lx, Ly)까지의 직선이 된다.

Fig. 4에서 보인 바와 같이 렌즈에서 CCD까지의 경로를 구하기 위해, 우선 시야범위 내의 모든 위치에서 반사되는 레이저광의 초점을 정확히 맞추기 위한 Scheimpflug의 조건⁴⁾을 적용하여 CCD의 위치 및 각도를 설정하였다. 회전거울의 회전각이 0일 때, 가상의 레이저발생위치와 가상의 렌즈위치사이의 거리는 d 이므로, l 의 위치 $l = \sqrt{l^2 + (d/2)^2}$ 에서 반사되는 레이저광과 렌즈와의 직선거리는 l 이 되고, l 위치에서 렌즈에 수직으로 입사되는 광의 경우, 초점이 맞는 상은 가성렌즈의 뒤에 직선거리 $lf/(l-f)$ 만큼 벗어나 형성될 수 있다. Scheimpflug의 조건을 적용하면, CCD의 직선과 렌즈의 직선이 교차하는 위치가 광축(여기서는 레이저광이 위치한 x 위치)상에 놓여야 하므로, 카메라 렌즈와 CCD간의 상대각도는 $\beta = \tan^{-1}(\frac{2lf}{l d(l-f)})$ 와 같이 구해진다. 한편, 이를 Fig. 4와 같이, 실제 렌즈의 경우에 대응해 보면, 실제 렌즈 방향을 x 축에 나란하게 두면, l 위치에서 반사된 광은 렌즈와 상대거리 ($0, lf/(l-f)$)만큼 떨어진 곳에서 초점이 맞게 된다. 따라서 CCD의 직선식은 렌즈와의 상대각도 β 인 기울기를 가지고 점($Lx, Ly + lf/(l-f)$)를 지나는 직선식으로 나타낼 수 있다. 따라서 CCD의 직선식과 렌즈를 지나는 광의 경로가 만나는 위치가 CCD에서 촬영되는 레이저 상의 위치가 된다. CCD좌표계는 절대좌

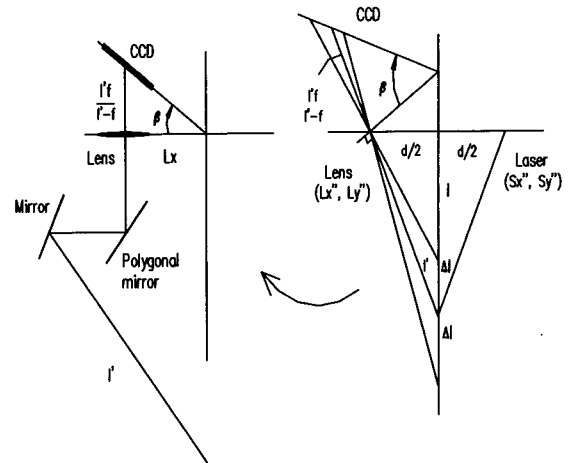


Fig. 4 Virtual and actual sensor structures and CCD configuration using Scheimpflug's condition

표계상의 위치를 CCD직선에 투영하여 얻을 수 있다.

4. 결과 및 고찰

제안된 시각센서의 측정정도를 검증하기 위해, 설계 데이터로서, 팔각회전거울에서 거울각 θ_0 는 45도, R의 크기는 10mm, 고정반사거울에서 경사각을 50도, 길이 및 폭의 각 방향 크기를 30mm로 선정하고, 카메라에서 CCD의 길이는 6mm, 픽셀의 크기는 0.017mm, 렌즈의 초점거리는 12mm로 선정하였고, 각 광학 요소간의 위치에서 고정거울의 위치 s 는 20mm, 레이저 위치 S_y 는 -20mm, 렌즈의 위치 L_x 는 20mm로 각각 설정하였다.

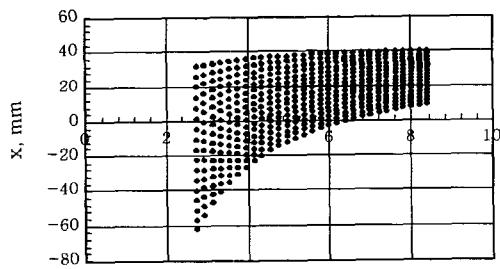
모델링 과정에서 유도한 관계식과 설계데이터를 이용하여 카메라좌표(p)와 절대좌표(x,y)사이의 대응관계를 계산한 결과, CCD 좌표를 2.5mm에서 8.5mm(길이 : 6mm)까지 변화하고 주사각도(θ) 범위를 -8도에서 8도까지 변화하였을 경우, 각각의 일대일 대응관계가 산출이 가능하였으며, 이를 동시에 나타내면 Fig. 5에 보인 결과와 같고, 이는 시각센서의 시야범위가 된다. Fig. 5(a)는 제안된 시각센서의 x방향 측정가능 범위를 보여주고 있다. CCD 좌표 p의 위치가 증가할수록 물체에서 양의 위치만이 측정가능하고, p의 위치가 감소할수록 음의 위치로 측정가능한 부분이 증가하고 있음을 보여주고 있다. 이는 제안된 센서구조에서 카메라가 촬영 가능한 범위가 변화함을 보이는 결과로, 측정의 목적에 부합하기 위해서는 센서에서 좌우대칭으로 측정구간이 설정되도록 센서를 설계해야 한다. 따라서, 양과 음의 부가 공히 얻어질 수 있도록 2.5mm에서

4.5mm까지의 위치에 해당하는 CCD의 크기를 선정하면, 측정구간이 센서를 중심으로 대략 대칭적으로 얻어질 수 있고, 이때 x 방향 시야범위는 $-18 < x < 35$ mm가 된다. Fig. 5(b)는 제안된 시각센서의 y 방향 측정 가능범위를 나타낸 결과로, p를 2.5mm에서 8.5mm까지 변화했을 때, -300mm에서 -50mm까지 계속됨을 보이고 있다. 2.5mm에서 4.5mm까지의 위치에 CCD가 놓이게 되면, y방향의 시야범위는 센서로부터 130mm에서 300mm까지로 설정할 수 있다. 따라서 제안된 시각센서는 설정된 설계조건에서, 좌우 53mm범위, 상하 170mm의 시야범위를 갖게 된다. 한편, 시각센서의 실제 운용에서 p는 카메라에 상이 형성되는 위치이므로, 이미지처리를 통해 카메라에서의 위치를 인식해야 한다. 주사각은 모터의 회전위치를 계속함으로써 규명될 수 있는 값이다.

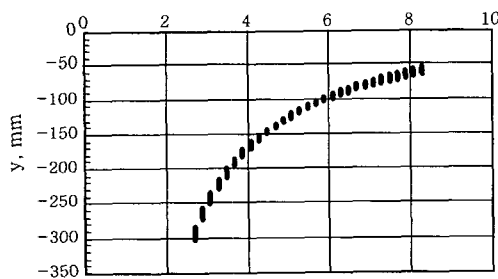
Fig. 6은 레이저의 주사각을 0도로 두고 CCD의 위치를 2.5mm에서 8.5mm까지 변화하였을 때, 제안된 시각센서의 x 및 y 방향의 분해능을 계산한 결과로, Fig. 6(a)는 카메라 렌즈의 초점거리 $f=12$ mm인 경우, x 및 y방향 공허 p의 크기가 증가할수록 분해능이 향상됨을 보이고 있고, 시야범위($p=2.5-4.5$ mm)에서 x방향의 분해능은 0.55-0.1mm이고, y 방향의 분해능은 3.1-0.75mm 정도로 나타났다. Fig. 6(b)는 $f=40$ mm인 경우로, Fig. 6(a)에 비해 초점이 증가할수록 분해능을 향상시킬 수 있음을 보여주고 있고, 이때

x방향의 분해능은 0.02-0.03mm이고, y 방향의 분해능은 0.15-0.2mm 정도로 나타났다. 이와 같은 결과는, 계측대상공정의 분해능이 고려되어야 할 경우는 특히 렌즈의 초점거리를 모델링과정을 통해 적절하게 선정할 수 있음을 보여 주고 있다. 따라서 용접접합부의 형상계측용으로 적합한 분해능을 얻기 위해서는 $f=40$ mm 정도가 필요함을 보이고 있다.

Fig. 7은 설계된 시각센서의 구동기구를 시뮬레이션한 결과로, 레이저에서 투사된 레이저광이 차례로 회전 거울에 반사되고, 고정거울에 반사되며, 물체에 반사되는 과정을 보여주고 있다. 물체에 반사된 광의 일부가 차례로 우측의 고정거울에 반사되고, 회전거울에 반사되며, 최종적으로 렌즈에 집광되어 카메라에 상을 형성하게 된다. 센서 중앙의 회전거울을 회전함으로써 레이저가 물체의 좌우로 정확히 주사되고 있고 반사된 광이 카메라의 렌즈에서 집광됨을 보이고 있으며, 회전거울의 회전에 따라 레이저의 투사각과 카메라에서의 반사각은 자동 동기화 됨으로써, 물체에 반사된 레이저광은, 반사위치가 동일 높이의 경우는, 폭 방향으로의 반사위치에 무관하게 CCD의 한 위치에 상을 형성하게 됨을 보여주고 있다. Fig. 7에서는 특히 물체까지의 거리를 200mm로 두고, 회전거울의 각도를 -5도에서 5도까지 회전한 경우, 물체에 반사된 레이저광은 모두 CCD의 4.3mm위치 주위에 상을 형성하게 됨을 알 수 있다. 각도에 따라 다소의 차이가 발생하는 결과는, 가상의 레이저와 렌즈사이의 거리가 실제적으로 변화함에도,

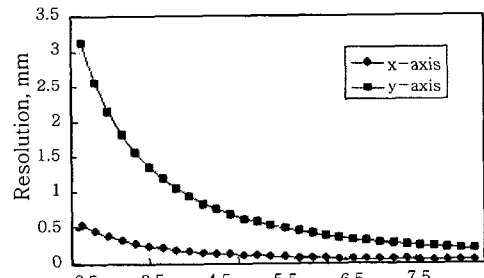


(a) x-directional field of view

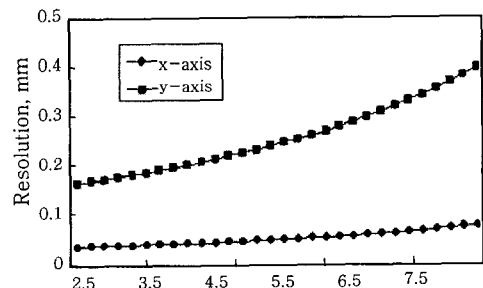


(a) y-directional field of view

Fig. 5 Field of view with CCD coordinate



(a) Focal length = 12mm



(a) Focal length = 40mm

Fig. 6 Resolution with CCD coordinate

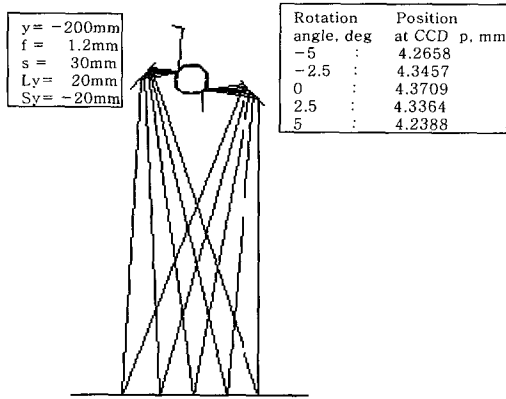


Fig. 7 Sensor simulation with scanning of laser using rotation of polygonal mirror

레이저와 렌즈의 위치는 고정된 크기로 설계를 해야 하기 때문에 발생한 결과이다. 이와 같은 불가피한 오차는 실제 센서의 제작시에 센서 보정을 통해 교정할 수 있다. 이와 같이 나타난 결과는 제안된 시각센서의 구조가 적절하며, 정확히 모델링된 결과로 판단할 수 있다. 따라서 카메라 이미지 위치와 주사각의 변화로써 달체 표면의 각 위치에서의 높이를 계측할 수 있으므로, 제안된 센서를 용접자동화를 위한 시각센서로 활용할 경우, 실시간으로 용접접합부의 형상 측정이 가능하게 된다.

5. 결 론

한 방향으로 회전시킨 팔각거울로써 레이저를 용접접합부의 표면에 주사하여 용접접합부까지의 거리 또는 접합부형상을 계측할 수 있는 레이저 주사형 시각센서를 제안하여, 모델링과 시뮬레이션을 통해 설계하는 과정에서 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) 시각센서의 구조에서, 레이저와 렌즈의 배치를 축대칭 형태로 둬므로써 주사각과 입사각의 변화가 자동으로 동기될 수 있게 하였고, 시야범위 내의 모든 이미지의 초점을 맞추는 조건을 적용하여 카메라를 배치할 수 있었다.

2) 가상의 레이저, 가상의 렌즈, 반사거울 등의 기하학적 모델링을 통해, 카메라에 형성된 상의 위치와 거울의 회전각도로서, 레이저광이 물체에서 반사된 위치까지의 상하 및 좌우 거리를 정확히 예측할 수 있었다.

3) 시각센서의 모델링 결과, 광학요소의 형상, 특징, 구성 등의 변화를 고려한 시각센서의 설계에서 시야범위 및 분해능의 용이한 산출이 가능하였다.

4) 레이저광의 경로를 기하학적으로 시뮬레이션한 결과, 물체까지의 거리 및 거울의 회전각도 변화에 의한 레이저의 주사 및 반사경로와 수광위치를 도식적이고 효율적으로 검증할 수 있었고, 시각센서의 설계에서 거울의 크기, 카메라의 크기 등 각 광학요소의 크기 및 구성을 용이하게 변경 및 설정할 수 있었다.

참 고 문 헌

1. C.-W. Lee and S.-J Na: Vision Sensor for Welding Automation, *Journal of KWS*, 11-3(1993), 10~21(in Korean)
2. K.-Y. Bae and J.-H. Lee: A Study on Development of Automatic Weld-Seam Tracking System using Vision Sensor, *Journal of KWS*, 14-4(1996), 79~88(in Korean)
3. Servo-Robot Inc.: *M-SPOT-90 Miniature Laser Range Camera*, 1994
4. W.J.P.A.Verbek, L.J.H.J.Beckmann and G.L.Oomen: Control Strategy for An Arc Welding Robot under Sensory Guidance, Proc. of the 5th Intern. Conf. on Robot Vision and Sensory Controls, 1985, 541~550
5. W.-S. Yoo and S.-J. Na: A Study on the Vision Sensor Using Scanning Beam for Welding Process Automation, *Journal of KSME(A)*, 20-3(1996), 891~900(in Korean)
6. R. Baribeau, M. Rioux, and G. Godin: Color Reflectance Modelling Using A Polychromatic Laser Range Sensor, *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 14-2(1992), 263~269
7. M. Rioux: Laser Range-Finder Based on Synchronized Scanners, *Robotic Sensors*, 1(1986), 175~190
8. Y.-W. Oh and S.-Y. Shin : *Computer Graphics*, Hongreung Science Press, 1993(in Korean)

부 록

$$\frac{dp}{dp'} = \frac{c1(p'd1 + d2) - d1(p'c1 + c2)}{(p'd1 + d2)^2} \quad (A.1)$$

여기서, $a1 = -v' + v'' \sin \delta + v'' \tan \theta \cos \delta$,
 $a2 = v' \cos \delta + v' \tan \theta - v'' \tan \theta \sin \delta$,
 $b1 = \sin \delta + \tan \theta \cos \delta$,
 $b2 = \cos \delta - \tan \theta \sin \delta$,

$$c1 = a1 \cos \delta - a2 \sin \delta,$$

$$c2 = -a1 v'' \cos \delta - a2 (v' - v'' \sin \delta),$$

$$d1 = b1 \cos \delta - b2 \sin \delta,$$

$$d2 = -b1 v'' \cos \delta - b2 (v' - v'' \sin \delta) \text{ 이다.}$$

$$\frac{dx}{dp} = \frac{-e2(ph2 + i1) - (-pe2 + h1)h2}{(ph2 + i1)^2} \quad (A.2)$$

여기서 $e_1 = v \tan \delta, e_2 = d \cos \delta (2l + d \tan \theta),$
 $f_1 = e_2 / d, f_2 = v / \cos \delta, g_1 = \sin \delta,$
 $g_2 = d - 2l \tan \theta,$
 $h_1 = e_1 e_2, h_2 = -f_1 - g_1 g_2,$
 $i_1 = e_1 f_1 - f_2 g_2 + e_1 g_1 g_2$ 이다.

$$\frac{dy}{dp} = \frac{j_1(p k_1 + k_2) - k_1(p j_1 + j_2)}{(p k_1 + k_2)^2} \quad (\text{A.3})$$

여기서, $j_2 = d(2l + d \tan \theta), j_1 = g_1 j_2,$
 $f_2 = f_2 i_2 - e_1 g_1 i_2, k_1 = -f_1 - g_1 g_2,$
 $k_2 = f_1 e_1 - f_2 g_2 + e_1 g_1 g_2$ 이다.