

## 비전시스템에 의한 열간 선재 단면 측정

### Measurement of Hot WireRod Cross-Section by Vision System

박 중 조, 탁 영 봉

(Joong-Jo Park and Young-Bong Tak)

**Abstract** : In this paper, we present a vision system which measures the cross-section of a hot wire-rod in the steel plant. We developed a mobile vision system capable of accurate measurement, which is strong to vibration and jolt when moving. Our system uses green laser light sources and CCD cameras as a sensor, where laser sheet beams form a cross-section contour on the surface of the hot wire-rod and the reflected light from the wire-rod is imaged on the CCD cameras. We use four lasers and four cameras to obtain the image with the complete cross-section contour without an occlusion region. We also perform camera calibrations to obtain each camera's physical parameters by using a single calibration pattern sheet. In our measuring algorithm, distorted four-camera images are corrected by using the camera calibration information and added to generate an image with the complete cross-section contour of the wire-rod. Then, from this image, the cross-section contour of the wire rod is extracted by preprocessing and segmentation, and its height, width and area are measured.

**Keywords** : mobile vision system, measurement, green laser, camera calibration

#### I. 서론

최근 컴퓨터 기술의 비약적인 발전으로 머신비전(machine vision)은 산업체의 제조공정에서 생산 자동화 및 품질검사 등에 많이 응용되고 있다. 특히 이는 레이저와 결합할 경우 정밀 계측에 적합한 방식으로 채택될 수 있다. 일반적으로 레이저를 이용한 머신비전의 경우 레이저를 광원으로 사용하고 카메라로 레이저 빔이 조사된 물체를 촬영하여 영상처리 기법으로 물체를 측정하게 된다[1]. 본 연구에서는 레이저와 CCD 카메라를 이용하여 제철소 선재공장에서 생산중인 열간 선재(WireRod)의 단면 치수를 측정하는 비전시스템을 설계 구현하였다.

제철소 선재공장의 생산 공정은 그림 1의 블록도로 나타낼 수 있다. 즉, 일정한 크기의 빌렛(billet)은 가열로(furnace)에 들어가서 약 1200° C로 가열되고, 이는 여러 단계의 스탠드(stand)를 통과해 가면서 더욱 가느다란 선재(WireRod)로 압착되며, 최종 단계에서 코일(coil) 제품으로 생산된다. 이때 각 스탠드내에는 롤(roll)이 설치되어 있어서 선재가 스탠드들을 통과함에 따라 그 두께가 점차로 가늘게 되는데, 최종단계에서 코일 제품이 규정된 단면 크기로 생산되도록 하기 위해, 공정중의 각 스탠드 사이의 선재의 단면은 미리 지정된 높이와 폭으로 유지되어야 한다. 이를 위해 각 스탠드 사이에서 선재의 높이는 정밀하게 측정되어야 하는데, 이때 이 측정치가 기준치에서 벗어날 경우 각 스탠드 내부의 롤을 조정하여 선재의 앞착 정도를 변화시킴으로써 선재가 지정된 높이와 폭으로 유지되도록 해 주어야 한다. 공정상 이러한 롤의 조정을 위해 선재 단면의 측정은 후단부에서 매우 정밀해야 하며, 전단부에서는 다소의 오차가 허용된다. 따라서 현재 제철소에서는 선재 공정의 전단부들에 대해서는 작업자가 주기적으로 수작업에 의해 선재의 단면을 1%의 오차 범위

내에서 측정하고 그에 따라 수작업으로 롤을 조정해 주고 있으며, 후단부에서는 고가의 측정 장치를 사용하여 자동으로 정밀측정 및 조정을 하고 있는 실정이다. 그런데, 공정 전단부에서 선재는 수백도의 고온으로서 작업자가 직접 단면의 치수를 측정하는 것은 매우 위험하며, 또한 수작업에 의한 측정이므로 그 정밀도에 문제가 있다. 따라서, 공정의 전단부에 대해 1%이내의 오차로 선재 단면의 높이와 폭을 측정할 수 있는 자동 측정기의 개발이 필요한 실정이다. 본 제철소의 경우 공정의 전단부에서는 선재 단면의 최소 치수가 50[mm] 이상이므로 0.5[mm] 오차 이내의 측정이 필요하다.

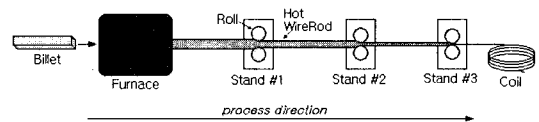


그림 1. 제철소 선재공장 공정의 블록도.

Fig. 1. Block diagram of WireRod mill process in steel plant.

이에 본 논문에서는 레이저의 sheet beam을 열간 선재에 수직으로 조사하여 선재 단면의 윤곽선을 만들고 이를 카메라로 촬영하여 열간 선재의 단면 치수를 측정하는 비접촉 계측방법을 제시한다. 열간 선재에 레이저 빔을 수직으로 조사할 경우 이 선재 단면 윤곽선의 일부분만이 나타나게 되므로, 4대의 레이저를 90° 간격으로 배치하여 sheet beam을 조사하고, 역시 90° 간격으로 배치된 4대의 카메라로 선재의 표면에 나타나 있는 레이저 빔 라인을 촬영하여 완전한 선재 단면 윤곽선을 얻은 후, 영상처리를 통하여 선재 단면 치수를 측정한다[2][5]. 측정하고자 하는 열간 선재는 수백도의 고온으로서 선홍색의 밝은 빛을 띠고 있으므로 영상처리 과정에서 영상분할의 용이성을 위해 녹색 레이저를 사용하였다. 또한 이 선재는 공정중에

여러 스탠드를 통과하면서 이동하고 있으므로 4대의 카메라로 동시에 촬영할 수 있는 영상취득기를 채택하여 사용하였다. 본 방법에서는 카메라가 약 35°의 비스듬한 각도로 선재를 촬영하므로 일단 카메라와 레이저가 고정 설치되고 나면 각 카메라에 대해 카메라 보정(camera calibration)이 필요하다.[3]-[5] 본 시스템을 실제 제철소 현장에서 실험하여 0.5[mm] 이내의 오차로 선재 단면을 측정할 수 있었다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. I장의 서론에 이어, II장에서는 계측 방법 및 시스템 구성을 기술하고, III장에서는 본 시스템에서 사용하는 카메라 보정 방법을 제시하였다. IV장에서는 선재 단면의 계측에 필요한 영상 처리 알고리즘을 설명하였고, V장에 실험 결과와 고찰을 실었다. 마지막으로 VI장에서 결론을 맺는다.

**II. 계측 방법 및 시스템 구성**

**1. 계측 방법**

본 시스템은 4대의 레이저를 광원으로 사용하며, 4대의 카메라로 선재의 표면에서 반사되는 레이저 sheet beam을 촬영하여 영상처리를 통해 선재의 단면을 측정한다. 그림 2는 본 시스템이 사용하는 계측 방법의 원리를 직각 좌표계에서 보이고 있다. XYZ 좌표계를 기준으로 4대의 카메라는 모두 Z=0인 XY 평면상에 배치되며 카메라 1,2,3,4의

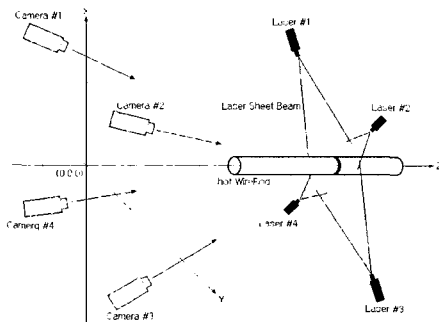


그림 2. 계측 원리.  
Fig. 2. Principle of measurement.

위치는 각각 좌표값 (XC,-YC, 0), (XC,YC, 0), (-XC,YC, 0), (-XC,-YC, 0)로 나타낼 수 있다. 또한 4대의 레이저는 Z=Z'인 XY 평면상에 배치되며 레이저 1,2,3,4의 위치는 각각 좌표값 (XL,-YL,Z'), (XL,YL,Z'), (-XL,YL,Z'), (-XL,-YL,Z')로 나타낼 수 있다. 이때 각 레이저들의 sheet beam들은 Z축에 수직이면서 상호 일치되어 하나의 평면을 이루게 되며, 각 카메라들은 응시방향이 sheet beam 평면의 중앙부를 향하도록 약 35°의 각도로 비스듬히 배치된다. 이때 선재는 Z축을 따라서 이동되며, 레이저의 sheet beam은 이 선재의 표면에 하나의 선을 그리게 되는데 이 선이 선재의 단면 외곽선을 이루게 된다. 이러한 배치에서 각 카메라로 선재를 촬영하면 취득되는 각 카메라 영상에는 그 카메라의 시야에 들어오는 선재 단면 외곽선의 일부분만이 나타나게 된다. 본 시스템에서는 이들 4장의 카메라 영상을 합성하여 하나의 완전한 단면 외곽선

영상을 얻고, 이 합성 영상으로부터 선재 단면의 높이와 폭 및 면적을 영상처리 기법으로 측정한다. 이 과정에서 각 카메라는 선재를 비스듬히 보고 있으므로 촬영시 취득되는 각각의 카메라 영상은 찌그러진 형태의 것이 된다. 따라서 카메라 보정(camera calibration) 정보를 이용하여 각 카메라 영상을 변환시킴으로써 선재 단면 외곽선을 원래의 형태로 복구시킨 후 합성해야 한다. 이때 카메라 보정 정보는 각각의 카메라에 대해 개별적으로 구해야 하며, 모든 카메라와 레이저의 sheet beam 평면은 그 배치가 고정되어 있으므로 이 카메라 보정 정보들은 시스템을 설치한 후 초기에 한번 구하면 된다.

**2. 시스템 구성**

그림 3은 본 계측 시스템의 구성도를 보인다. 산업용 PC를 중앙 처리기로 사용하였으며, PC에 장착되는 Frame Grabber로는 4개의 카메라로부터 동시에 영상을 취득할 수 있는 4-채널용을 사용하였다.

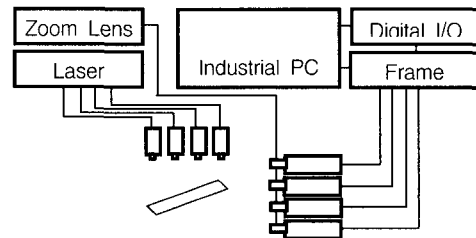


그림 3. 시스템 구성.  
Fig. 3. System configuration.

열간 선재는 계속 이동하고 있으므로 4대의 카메라는 동시에 영상을 취득해야 한다. 따라서 영상 취득기의 외부 트리거 모듈 사용하여 영상을 취득하였으며, 이때 외부 트리거 신호는 PC에 장착된 Digital I/O 보드를 이용하여 발생시켰다. 선재공장에서 공정중의 선재는 약 900°C로써 밝은 선홍색이다. 따라서 조명원으로서 적색 레이저를 사용하면 열간 선재와 레이저 라인의 색상이 유사하여 카메라로 취득된 영상에서 레이저 라인만을 분리해 내는 것이 거의 불가능하다. 이러한 이유로 본 시스템에서는 광원으로 적색 레이저를 사용하였으며 카메라에 적색통과 필터렌즈를 취부하여 취득된 카메라 영상에서 레이저 라인만이 뚜렷하게 나타나도록 하였다. 카메라와 열간 선재 표면에 나타나는 레이저 라인 사이의 거리는 약 45 [cm]로서 매우 가까운 거리이고 초점을 맞추기가 곤란하여 줌 렌즈를 카메라에 취부하였다. 이 줌 렌즈는 별도의 제어기를 가지고 있으며 일단 카메라와 레이저가 고정 설치된 후 한번만 조정해 주면 된다.

**III. 카메라 보정 (camera calibration)**

**1. 이론적 배경**

투시변환(Perspective Transformation)은 world 좌표계(3D 공간)상의 한 점 (X,Y,Z)을 투영하여, 그에 대응한 카메라 좌표계상의 영상 표면(2D 평면)위의 점(x,y)를 구하는 변환이다[1][2].

Cartesian coordinates에서의 좌표점  $g=(X,Y,Z)$ 은 Homogeneous coordinates에서는  $g_h=(kX,kY,kZ,k)$ 으로 정의되는데(여기서,  $k =$  임의 상수), world 좌표계와 카메라 좌표계가 일치된 경우 이 Homogeneous coordinates를 이용하면 (1)로 주어지는 투시변환에 의해 world 좌표계상의 한 점  $w=(X,Y,Z)$ 에 대응한 카메라 좌표계상의 점  $c=(x,y,z)$ 를 구할 수 있다.

$$c_h = Pw_h, \text{ where } P \triangleq \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{\lambda} & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서,  $w_h$  와  $c_h$ 는 각각 Cartesian coordinates인  $w$  와  $c$ 의 Homogeneous coordinates 표현이고,  $P$ 는 투시변환행렬(Perspective Transformation matrix)이며,  $\lambda$ 는 카메라 렌즈의 초점거리(focal length)이다. 위 (1)로 구해진  $c_h$ 를 Cartesian coordinates  $c$ 로 변환하면 world 좌표계상의 점  $w$ 에 대응한 카메라 영상의 좌표값  $(x,y)$ 를 얻을 수 있다. 여기서,  $c$ 는  $c_h$ 의 4번째 요소로 첫 번째와 두 번째 및 세 번째 요소를 나눔으로써 구할 수 있다.

world 좌표계와 카메라 좌표계가 일치하지 않는 보다 일반적인 경우에는 상기의 투시변환을 직접 사용할 수 없다. 즉, 먼저 world 좌표계를 기준으로 한  $w$ 의 좌표값  $(X,Y,Z)$ 를 카메라 좌표계를 기준으로 한 좌표값  $w'=(X',Y',Z')$ 로 변환하고, 그후 이  $w'$ 에 투시변환을 적용해야  $c$ 를 구할 수 있다.

다음의 좌표값 이동 및 변환식 (2)에 의해 world 좌표계상의 임의 점의 좌표값  $w$ 는 카메라 좌표계 기준의 좌표값  $w'$ 으로 변환될 수 있다.

$$w'_h = R \alpha R \theta G w_h \quad (2)$$

$$\text{where, } G = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -X_0 \\ 0 & 1 & 0 & -Y_0 \\ 0 & 0 & 1 & -Z_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad R_\theta = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$R_\alpha = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & \sin \alpha & 0 \\ 0 & -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

여기서,  $w_h$ 와  $w'_h$ 는 각각 Cartesian coordinates  $w$ 와  $w'$ 의 Homogeneous coordinates 표현이고,  $G$ 는 변위용 변환행렬이며,  $R_\theta$ 와  $R_\alpha$ 는 카메라의 pan angle  $\theta$  및 tilt angle  $\alpha$ 만큼 회전시키는 변환행렬이다. 위 (2)에 투시변환  $c_h = Pw'_h$ 를 적용하면, world 좌표계상의 점  $w$ 에 대응한 카메라 좌표계상의 점  $c$ 의 좌표값은 다음 (3)에 의해 구해진다.

$$c_h = PR_\alpha R_\theta G w_h \quad (3)$$

상기의 (3)에서 합성변환행렬  $R_\alpha R_\theta G$ 를 구하려면 모든 카메라 파라미터를 미리 알아야 한다. 카메라 파라미터는 렌즈의 초점거리, world 좌표계에 대한 카메라의 위치, 카메라의 pan angle과 tilt angle인데, 이들을 구하는 것은 쉬운 일이 아니다. 따라서, 실용적으로는 상기의 방법을 사용하는 대신 카메라 보정(Camera Calibration) 방법이 사용

된다[1]-[5].

카메라 보정이란 미리 지정된 calibration용 표본 물체를 카메라로 촬영하여, 이미 알고있는 많은 표본 물체내의 점  $w$ 들의 좌표값  $(X,Y,Z)$ 들과 카메라로 촬영하여 얻어진 영상내의 대응점  $c$ 들의 좌표값  $(x,y)$ 들의 샘플 데이터를 사용함으로써, 계산에 의해 카메라 파라미터 정보를 얻는 방법이다. 카메라 보정 방법은 다음과 같다. 상기의 (3)에서  $PR_\alpha R_\theta G = A$ 라 놓으면 (4)로 표현되며, 이때 합성변환행렬  $A$ 는 카메라보정 변환행렬로서 모든 카메라 파라미터 정보를 포함하고 있다.

$$ALD \ c_h = A w_h \quad (4)$$

(4)의  $w_h$ 에서  $k=1$ 로 놓으면 이는 (5)로 표현된다.

$$\begin{bmatrix} c_{h0} \\ c_{h1} \\ c_{h2} \\ c_{h3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{00} & a_{01} & a_{02} & a_{03} \\ a_{10} & a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{20} & a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{30} & a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

이 때,  $c_h$ 의 Cartesian coordinate  $c$ 는  $c_h$ 의 각 요소를 그의 4번째 요소로 나누면 된다. 즉,  $c=(x,y,z)$ 에서  $x=c_{h0}/c_{h3}$ ,  $y=c_{h1}/c_{h3}$ 로 계산된다. 따라서  $c_{h0}=x c_{h3}$ ,  $c_{h1}=y c_{h3}$ 가 되고 이를 위 (5)에 대입하면 (6)이 얻어진다. 이때  $c_{h2}$ 는  $z$ 에 관련된 것이므로 생략한다.

$$\begin{aligned} x c_{h3} &= a_{00} X + a_{01} Y + a_{02} Z + a_{03} \\ y c_{h3} &= a_{10} X + a_{11} Y + a_{12} Z + a_{13} \end{aligned} \quad (6)$$

(6)에  $c_{h3} = a_{30} X + a_{31} Y + a_{32} Z + a_{33}$ 을 대입하면 (7)이 얻어진다.

$$\begin{aligned} a_{00} X + a_{01} Y + a_{02} Z + a_{03} - a_{30} x X - a_{31} x Y - a_{32} x Z - a_{33} x &= 0 \\ a_{10} X + a_{11} Y + a_{12} Z + a_{13} - a_{30} y X - a_{31} y Y - a_{32} y Z - a_{33} y &= 0 \end{aligned} \quad (7)$$

(7)에서 미지수  $a_{ij}$ 는 12개이며 이는 카메라 파라미터 정보를 포함하고 있다. 이들 미지수  $a_{ij}$ 를 구하려면 상기의 식으로부터 12개 이상의 연립방정식을 만들고 이를 수치 해석으로 풀면 된다[6].

결국, 카메라 보정 절차는 다음으로 요약된다.

- ①  $m \geq 6$  개의 지정된 좌표점  $(X_i, Y_i, Z_i)$ ,  $i=0,1,2,\dots, m-1$ 을 표시해 놓은 calibration용 표본물체를 만든다.
- ② 카메라와 표본물체를 정위치에 고정시킨 후, 카메라로 이 표본물체를 촬영하여 영상내에서 표본 물체의 지정된 좌표점에 대응한 점들의 좌표값  $(x_i, y_i)$ ,  $i=0,1,2,\dots, m-1$ 을 얻는다.
- ③ 이들 대응하는 좌표값들을 (7)에 대입하여 아래의 (8)로 이루어지는 연립방정식을 얻고 이를 풀어 12개의 미지수  $a_{ij}$ 를 구한다.

$$\begin{aligned} a_{00} X_i + a_{01} Y_i + a_{02} Z_i + a_{03} - a_{30} x_i X_i - a_{31} x_i Y_i \\ - a_{32} x_i Z_i - a_{33} x_i &= 0 \\ a_{10} X_i + a_{11} Y_i + a_{12} Z_i + a_{13} - a_{30} y_i X_i - a_{31} y_i Y_i \\ - a_{32} y_i Z_i - a_{33} y_i &= 0, \quad i = 0, 1, 2, \dots, m-1 \end{aligned} \quad (8)$$

이제 (7)을 사용하면, world 좌표계상의 물체내의 임의 점  $(X,Y,Z)$ 에 대응한 카메라 영상내의 점의 좌표  $(x,y)$ 를

계산으로 구할 수 있다. 한편 카메라 영상으로부터 world 좌표계상의 물체를 계측하는 경우에도 (7)를 이용하면 주어진  $(x,y)$  좌표값으로부터 그에 대응한  $(X,Y,Z)$ 를 구하면 된다. 물론 이때에는  $X,Y,Z$ 중에 어느 하나의 값을 미리 알고 있어야 한다.

2. 계측시스템의 카메라 보정

우리의 계측시스템에는 4대의 레이저와 4대의 카메라가 고정적으로 설치되어 있다. world 좌표계를 기준으로 그들의 배치를 나타내면, 4대의 카메라는 모두  $Z=0$ 인 XY 평면상에 설치되며 각각 좌표값  $(X_{Ci}, Y_{Ci}, 0), i=1,2,3,4$ 으로 나타낼 수 있다. 또한 4대의 레이저는  $Z=Z'$ 인 XY평면상에 설치되며 각각 좌표값  $(X_{Li}, Y_{Li}, Z'), i=1,2,3,4$ 로 나타낼 수 있다. 이때 각 레이저들은 그의 sheet beam이 Z축에 수직이면서 상호 일치되어 하나의 평면을 이루도록 배치되며, 각 카메라들은 응시방향이 sheet beam 평면의 중앙부를 향하도록 약  $35^\circ$ 의 각도로 비스듬히 배치된다.

본 시스템에서는 카메라 보정을 위해 6개의 좌표점을 사용하며, 그에 따라 카메라 보정용 표본 물체로서 그림 4(a)와 같은 6개의 좌표점을 표시한 카메라보정용 표본 평판(camera calibration sheet)을 제작하였다. 이 그림에서, 표본 평판상의 6개의 기준 좌표점은  $(X_0, Y_0), (X_1, Y_1), (X_2, Y_2), (X_3, Y_3), (X_4, Y_4), (X_5, Y_5)$ 로 표기되며, 이들 좌표점은 [mm] 단위로써 실제 좌표값이다. 본 시스템이 측정하는 선재의 단면 크기는 높이 100[mm]이하, 폭 180[mm]이하이므로 이들 기준점의 좌표값을  $(X_0, Y_0) = (10, 10), (X_1, Y_1) = (10, 70), (X_2, Y_2) = (10, 130), (X_3, Y_3) = (210, 10), (X_4, Y_4) = (210, 70), (X_5, Y_5) = (210, 130)$ 으로 하였다.

카메라 보정을 위해서 이 표본 평판을 레이저 Sheet Beam 평면에 일치하게 (즉, world 좌표계에서  $Z=Z'$ 인 XY 평면상에)배치하고, 카메라로 이 표본 평판을 촬영한다.

그림 4(b)는 하나의 카메라로 취득한 카메라 영상의 예를 보인다. 이 그림에서 보면, 카메라 영상이 찌그러져 보이는데, 이는 비스듬하게 각도를 가지고 취부되어 있는 카메라가 표본 평판을 촬영하기 때문이다. 카메라 영상내의 6개의 좌표점은  $(x_0, y_0), (x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3), (x_4, y_4), (x_5, y_5)$ 로 표기되며, 이들 좌표점은 화소(pixel) 단위로써 카메라 영상에서의 화소 좌표값이다.

이 때 표본 평판상의 6개 좌표점은 고정된 것으로서 이미 알고 있는 것이고, 카메라 영상의 6개 좌표점에 대해서는 그 화소 위치의 좌표값을 수작업으로 구해야 한다. 일단 12개의 모든 좌표값이 얻어지고 나면, 표본 평판과 카메라 영상사이의 대응되는 6개 좌표점 쌍을 상호 매칭시키는 카메라보정 변환행렬 A를 (8)을 사용하여 구한다. 이 식에서  $(X_i, Y_i, Z_i)$ 는 표본 평판의 각 좌표값이 되고,  $(x_i, y_i)$ 는 카메라 영상의 좌표값이 되며,  $m=6$ 이 된다. 그런데 이 식에서  $X_i, Y_i$  값은 표본 평판으로부터 바로 구할 수가 있으나  $Z_i$  값은 알 수가 없는데, 이  $Z_i$  값으로는 실제의 배치에서 4대의 카메라들이 이루는 수직 평면의 중심과 4대의 레이저 sheet beam들이 이루는 수직 평면의 중심사이의 실제 거리를 사용하면 된다. 본 시스템에서는 모든  $Z_i$  값으로서 1000[mm]를 사용하였다. 이렇게 구해진 카메라

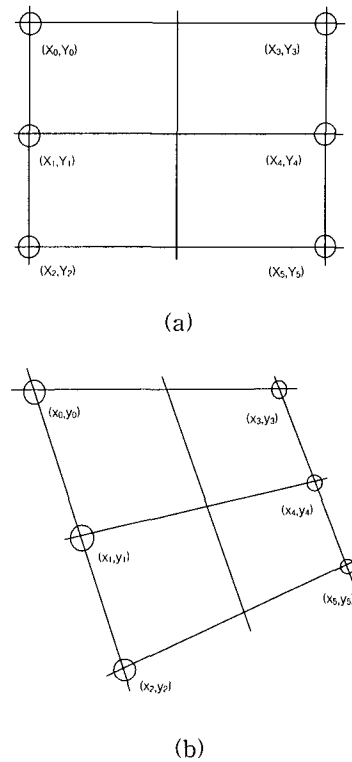


그림 4. 카메라보정용 표본 평판과 그의 카메라영상.

(a) 카메라보정용 표본평판, (b) 카메라영상.

Fig. 4. Camera calibration sheet and its camera image. (a) Camera calibration sheet, (b) Camera image.

보정 변환행렬 A는 레이저 sheet beam의 중앙부에 대한 카메라의 기하학적 배치정보를 가지게 된다. 이제 식 (7)를 사용하면 카메라 영상내의 모든  $(x,y)$  좌표점에 대응한 실제 물체의 좌표점  $(X,Y)$ 를 구할 수 있게 된다. 즉 식 (7)에 의해 그림 4(b)의 카메라 영상을 그림 4(a)의 형상을 갖는 영상으로 복원할 수가 있게 되며, 이 복원 영상에서 한 화소(pixel) 간격은 실제 물체의 1 [mm]에 대응하게 된다.

본 시스템의 경우, 카메라보정용 표본 평판을 고정 배치한 상태에서, 상기의 방법으로 4대의 카메라에 대해 각각 개별적으로 카메라보정 변환행렬을 구해야 한다. 그리고 각 변환행렬을 사용하여 각 카메라 영상을 복원하고 이를 합성하면 열간 선재의 완전한 단면 윤곽선을 갖는 영상이 얻어지게 되며, 영상처리를 통해 열간 선재의 단면의 높이와 폭 및 면적을 측정할 수 있게 된다.

IV. 영상 계측 알고리즘

본 계측시스템을 사용하여 선재의 단면을 측정하기 위해서, 먼저 비스듬한 방향에서 취득된 4장의 카메라 영상을 카메라보정 변환행렬을 사용하여 원래의 형상으로 복원하고, 그후 전처리를 통하여 선재의 단면 윤곽선을 배경으로부터 분할하며, 이로부터 선재 단면의 높이와 폭 및 면적을 계산한다. 이를 위해 본 계측 알고리즘은 다음의 6 단계로 구성된다.

첫 번째 단계에서는 4대의 카메라로부터 영상을 취득한다. 이때 카메라의 녹색통과 필터에 의해 각각의 영상에는 해당 카메라가 볼 수 있는 레이저 라인만이 상대적으로 밝게 나타나게 되며 선풍빛의 열간 선재 자체는 희미하게 나타난다. 이 때 레이저 라인은 선재의 단면 윤곽선에 해당된다. 취득된 카메라 영상은 크기가 640x480인 256 gray level의 흑백영상이다.

두 번째 단계에서는 취득된 카메라 영상을 임계화하여 레이저 라인을 배경으로부터 분할한다. 이 영상 분할을 4개의 카메라영상을 복원 및 합성한 이후에 하지 않고 취득된 각 카메라 영상에 직접 수행하는 이유는 4대의 레이저의 출력이 상호간에 완전히 동일하지 않기 때문에 각 카메라 영상에서 레이저 라인의 계조치가 미소하게 다르게 되고 따라서 합성영상에서 영상 분할을 할 경우 임계값의 선정이 매우 어렵게 되며, 출력이 낮은 레이저 빔에 의한 라인이 상실될 우려가 있기 때문이다. 많은 카메라영상들의 히스토그램을 조사해 본 결과, 대부분의 화소가 배경에 해당하는 어두운 값이고 레이저 라인에 속하는 화소들은 극히 넓은 범위에 걸쳐 큰 화소값으로 분포되어 있다. 여기서는 히스토그램에서 0 화소값부터 검사하여 개수가 100개를 넘지 않는 최초의 화소값을 임계값으로 결정하여 임계화함으로써 효과적으로 레이저 라인을 배경에서 분리할 수 있었다.

세 번째 단계에서는 (7)을 사용하여 앞 단계에서 처리된 각 카메라 영상을 복원한다. 즉, 찌그러진 형상인 카메라 영상의 모든 화소  $(x,y)$ 에 대응한  $(X,Y)$  좌표값을 계산한다. 이 때 Z값으로는 카메라보정 변환행렬을 만들 때 사용했던 값인 1000을 사용하면 된다. 실제적인 관점에서 이 복원 처리는 영상의 크기변환 및 회전에서 이용하는 방법을 사용하는 것이 편리하다. 즉, 카메라 영상의 화소  $(x,y)$ 로부터 복원 영상의 화소  $(X,Y)$ 를 계산하면 복원 영상내의 모든 화소에 대한 화소값이 계산되지 않으므로 복원 영상의 화소  $(X,Y)$ 에 대한 카메라 영상의 화소  $(x,y)$ 를 찾는 방식을 사용한다. 물론 이 때에는 복원 영상의 화소값 결정시에 보간 방법이 필요하다. 여기서는 2차 선형보간 방법을 사용하였다. 구해진 복원영상은 220x140 크기의 계조치 영상이 되며, 이는 찌그러진 카메라 영상을 바로 퍼서 실제 물체의 형태로 복원한 영상이다. 카메라 보정시에 표본 평판(calibration sheet)으로서 1 [mm] 단위의 기준 좌표점들을 사용하였으므로 이 복원영상의 각 화소 간격은 실제 물체의 1 [mm] 길이에 해당된다. 따라서 이 방법으로 계측할 경우 1 [mm] 오차 이내의 계측이 가능하다. 본 연구에서는 오차 정밀도를 더욱 향상시키기 위해서 subpixel 방법을 사용하였다. 즉, 표본 평판은 1 [mm]단위의 기준 좌표점들  $(X_i, Y_i)$ ,  $i=0,1,2,\dots,5$ 로 제작되었으나 카메라보정 변환행렬을 계산할 때에는 표본 평판의 기준 좌표점의 K배인  $(X_i * K, Y_i * K)$ ,  $i=0,1,2,\dots,5$ 를 사용한다. 그러면 상기 방법으로 복원된 영상은 원래의  $(X_i, Y_i)$ ,  $i=0,1,2,\dots,5$ 를 사용할 때보다 K배 확대된 영상이 되고 각 화소 간격은 실제 물체의  $1/K$  [mm] 길이에 해당된다. 본 연구에서는  $K=3$ 을 사용하였으며, 따라서 복원영상의 크기는 660x420 이 되고, 이 영

상에서 한 화소 간격은 실측의 0.33 [mm]에 해당된다. 4장의 카메라 영상으로부터 4장의 복원영상들이 구해지면, 이들 각 복원영상은 하나의 레이저 라인 선분을 포함하게 되는데 이는 선재 단면 외곽선의 일부분에 해당된다.

네 번째 단계에서는 각 카메라 복원영상들을 합성하여 4개의 레이저 라인을 결합함으로써 선재 단면 외곽선을 완성한다. 영상 합성 방법으로는 4장의 복원영상의 각 대응 화소에 대해 최대값을 취하는 방식을 사용하였다. 합성된 복원영상은 440x280 크기의 계조치 영상이 된다.

다섯 번째 단계에서는 선재 단면의 치수를 측정하기 위해 합성된 복원영상을 전처리한다. 먼저 평균화(averaging)를 수행하여 선재 단면 외곽선에 나타날 수 있는 작은 갭을 연결하고, 임계화(thresholding)를 통해 영상을 이치화한다. 합성된 복원영상은 두 번째 단계에 의해 이미 배경과 선재 단면 외곽선이 어느정도 분할된 상태이므로 임계값 선정은 용이하다. 여기서는 임계값으로서 50을 사용하였다. 그후 xy-투영(projection)을 사용하여 예상되는 선재 단면보다 작은 이물질들을 제거한다. 그리고 팽창(dilation)과 수축(erosion)연산을 적용하여 선재 단면 윤곽선의 평활화와 끊어진 부분의 복구를 수행한 후, 세선화(thinning)를 수행한다. 전처리가 완료된 영상은 선재 단면 윤곽선이 1 화소 두께로 이루어진 이치영상이 된다.

여섯 번째 단계에서는 전처리된 영상으로부터 선재 단면의 높이와 폭 그리고 면적을 계산한다. 높이는 영상을 스캔하여 최상단과 최하단에 나타나는 단면 윤곽선 부분을 탐지한 후 그 차이를 계산하여 구하고, 폭은 영상을 스캔하여 가장 좌측과 우측에 나타나는 단면 윤곽선 부분을 탐지함으로써 그 차이를 계산하여 구한다. 그리고 면적은 단면 윤곽선 내부를 이루는 화소의 총 개수를 계산하여 구한다. 본 영상은 한 화소 간격이 실측의 0.33 [mm]에 해당되므로 측정된 치수를 그에 맞게 조정해야 한다.

## V. 실험 및 고찰

본 계측시스템을 제작한 후, C 언어를 사용하여 계측 알고리즘을 구현하였다. 계측 프로그램은 윈도우즈 API 프로그램으로 구현하여 사용자가 GUI 방식으로 쉽게 사용할

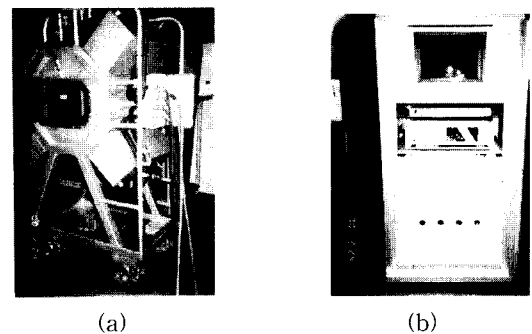


그림 5. 계측시스템 사진. (a) 이동식 센서장치, (b) 주 처리 장치.

Fig. 5. Photograph of the measuring system. (a) Mobile sensor unit, (b) Main processing unit.

수 있도록 하였다.

그림 5는 제작된 계측시스템의 사진을 보인다. 그림 5(a)는 이동식 센서장치로서 여기에는 카메라와 레이저가 설치되어 있다. 카메라는 1/2" CCD, 768x424 화소의 머신 비전용 흑백카메라로서 이에는 가변 초점거리 8~48[mm]인 줌렌즈가 취부되어 있다. 레이저는 파장이 532[nm]이고 sheet beam 폭이 1[mm]인 녹색 레이저광이다. 이 센서장치는 영상 취득시 고온의 선재에 접근시켜야 하므로 냉각용 압축공기 분사장치를 추가로 설치하였다. 그림 5(b)는 카메라 영상을 취득하고 이를 사용해 계측을 수행하는 주처리 장치로서, 산업용 PC, 영상취득장치, 줌 렌즈 제어기, 디지털 입출력 장치 및 전원장치로 구성된다. 영상취득장치는 외부 트리거 모드를 가진 4-채널용으로서 산업용 PC에 장착된다. 디지털 입출력장치는 8-비트 포트를 6개 가진 것으로서 역시 산업용 PC에 장착되며, 영상취득장치에 외부 트리거 신호를 입력시킴으로써 4대의 카메라가 동시에 촬영할 수 있게 한다. 이동식 센서장치와 주처리 장치 사이에는 20m의 전원선과 신호선으로 연결되어 있다.

그림 6은 본 계측시스템의 주처리 장치에서 나타나는 운용 소프트웨어의 초기 화면이다. 이 운용 소프트웨어는 GUI 방식으로 모든 동작이 수행되며, 측정 모드와 카메라

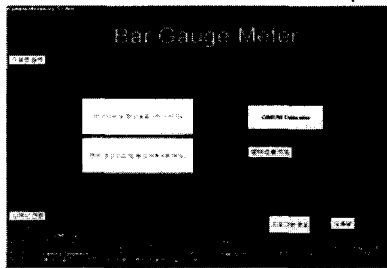


그림 6. 운용 소프트웨어의 초기화면.  
Fig. 6. Initial screen of operating software.

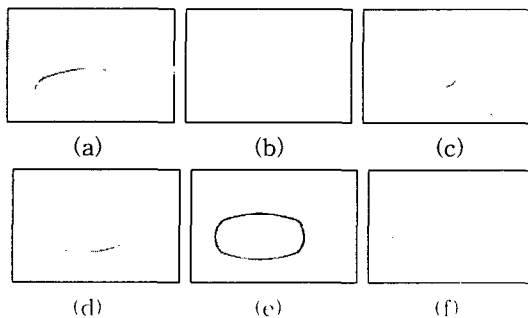


그림 7. 구역 5A의 처리 영상. (a) 카메라 #1 영상, (b) 카메라 #2 영상, (c) 카메라 #3 영상, (d)카메라 #4 영상, (e) 복원후 합성영상, (f) 전처리된 영상.  
Fig. 7. Processed image of zone 5A. (a) Image of camera #1, (b) Image of camera #2, (c) Image of camera #3, (d) Image of camera #4, (e) Added image after recovering, (f) Preprocessed image.

보정 모드로 구성된다. 카메라 보정은 초기 시스템 셋업시에 한번만 해주면 되는데, 만일 장기적으로 계측시스템을 사용하여 카메라와 레이저의 배치 각도가 다소 흔들리게 됨으로써 계측 정밀도에 이상이 생길 경우 다시 카메라 보정이 필요할 수 있다.

그림 7은 제철소 선재공장 구역 5A에서 측정 실험을 할 때 나타나는 영상들로서, 이 그림에서는 역상으로 보이고 있다. 그림 7(a)~(d)는 4대의 카메라로 취득된 영상이다. 그림에서 보이듯이 카메라의 녹색통과 필터에 의해 비교적 밝은 빛인 선홍색의 선재는 흐리게 나타나고 녹색 빛의 레이저 라인은 보다 뚜렷하게 나타나고 있다. 그림 7(e)는 각 카메라영상이 복원된 뒤 합성된 영상이고, 그림 7(f)는 전처리 과정을 거친 후의 세션화된 영상이다. 이 세션화 영상으로부터 선재의 단면 치수를 계산한다.

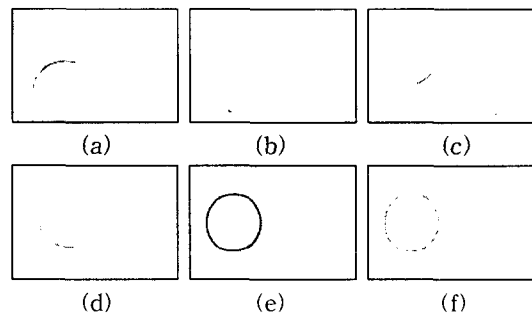


그림 8. 구역 5B의 처리 영상. (a) 카메라 #1 영상, (b) 카메라 #2 영상, (c) 카메라 #3 영상, (d) 카메라 #4 영상, (e) 복원후 합성영상, (f) 전처리된 영상.

Fig. 8. Processed image of zone 5B. (a) Image of camera #1, (b) Image of camera #2, (c) Image of camera #3, (d) Image of camera #4, (e) Added Image after recovering, (f) Preprocessed image.

그림 8은 제철소 선재공장 구역 5B에서 측정 실험을 할 때 나타나는 영상들로서, 이 그림에서는 역상으로 보이고 있다. 그림 8(a)~(d)는 4대의 카메라로 취득된 영상이다. 구역 5B에서의 선재의 온도는 구역 5A의 온도보다 약간 낮기 때문에 선재는 밝기가 다소 감소되어 구역 5A에 비해 더욱 흐리게 나타남을 볼 수 있다. 여기서도 레이저 라인은 역시 뚜렷하게 나타난다. 그림 8(e)는 각 카메라영상이 복원된 뒤 합성된 영상이고, 그림 8(f)는 전처리 과정을 거친 후의 세션화된 영상이다. 이 세션화 영상으로부터 선재의 단면 치수를 계산한다.

표 1은 선재공장 구역 5A에서 나타나는 선재에 대한 실험 결과이다. 높이가 57.5[mm]이고 폭이 118.2[mm]인 동일한 시편을 사용하여 45회 측정하고 평균 측정치 및 표준편차와 평균오차를 계산하였다. 이때 선재 단면의 면적에 대해서는 실측이 불가능하므로 이 표에는 평균측정치와 표준편차만을 나타내었다. 표에서 보이듯이 실험결과 본 시스템은 선재의 단면 치수를 실측치에 대해 0.5[mm] 이내의 정밀도로 측정할 수 있었다.

표 1. 높이, 폭 및 면적의 측정 결과.

Table 1. The measurement results of height, width and area.

	실측치	평균치 (측정치)	표준편차 (측정치)	평균오차	비고 (측정치 분포)
높이	57.5	57.63	0.13	0.25	57.33 ( 6회) 57.67 (37회) 58.0 ( 2회)
폭	118.2	118.23	0.19	0.18	118.0 (17회) 118.33 (25회) 118.67 ( 3회)
면적	-	5686.49	7.08	-	-

\*단위 : 높이,폭=[mm].면적=[mm<sup>2</sup>]

본 시스템에서 레이저의 sheet beam은 광원에 해당되는데, 실험 중에 4개의 레이저가 출력이 동일하지 않아 카메라 영상에서 영상분할을 할 때에 임계값의 선정에서 어려움을 겪었다. 본 시스템의 경우처럼 다수의 레이저를 동일 목적의 광원으로 사용시에는 각 레이저가 동일한 출력을 가지는가를 확인하는 것이 중요하다. 균일한 레이저광은 계측에 필요한 영상 전처리를 단순하게 해 주며, 계측 시간을 단축시키고 계측 신뢰도를 향상시킨다. 또한 카메라 보정용 표준 평판의 정밀 제작과 정밀한 보정 작업은 본 시스템의 정밀도를 위해 매우 중요하다. 본 계측시스템은 제철소에서 4 개월에 걸쳐 테스트되었으며, 테스트 기간 중에 시스템의 성능 향상을 위해 계측 알고리즘은 계속 수정되었다. 최종적으로 본 시스템은 0.5[mm]의 오차내에서 만족스러운 계측 성능을 나타내었다.

VI. 결론

본 연구에서는 레이저와 CCD 카메라를 이용하여 제철소 열간 선재의 단면 치수를 측정하는 비전시스템을 개발하였다. 이 시스템은 이동형 정밀 측정장치로서, 이동시 발생하는 진동과 흔들림에 강인하게 제작되었으며, 고정형에 비해 여러 구역에서 측정이 가능한 장점을 가진다.

선홍빛을 띤 고온의 열간 선재에 녹색 레이저를 조사하여 선재에 단면 윤곽선을 만들고, 카메라로 이를 촬영하여 영상처리를 통해 선재 단면 치수를 정밀하게 측정하였다.

4대의 레이저 광원과 카메라를 사용함으로써 사각영역 없이 선재의 완전한 단면 윤곽선을 측정할 수 있는 영상을 얻을 수 있었으며, 다수의 카메라로 동일물체의 치수를 측정할 수 있는 카메라 보정 방법을 제시하였다. 현장 실험을 통하여 본 시스템이 선재 단면의 치수를 0.5[mm] 이내의 정밀도로 측정할 수 있음을 확인하였다. 실험 결과 본 방법에 의한 계측시 정밀계측을 위해 가장 유념해야 할 사항은 각 레이저광의 출력이 동일해야 하며, 카메라 보정 작업을 매우 정밀하게 수행해야 한다는 것이다. 특히 카메라 보정용 표준평판은 극히 정밀하게 제작되어야 한다. 본 시스템은 복잡한 형상의 윤곽선도 복원해 낼 수 있으며, 카메라 sheet beam의 두께를 더욱 얇게 함으로써 보다 정밀한 계측도 가능할 것으로 생각된다. 본 시스템은 현재 제철소 선재공장에 설치되어 사용중이다.

참고문헌

- [1] B. Jahne, H. Haubecker, and P. Geibler, *Handbook of Computer vision and Applications*, Academic Press, 1999.
- [2] R. C. Gonzalez and R. E. Woods, *Digital Image Processing*, Addison-Wesley, 1992.
- [3] Y. Zhou and B. J. Neison, "Calibration of a parametric model of an optical microscope", *Optical Engineering*, vol. 38, no. 12, pp. 1989-1995, 1999.
- [4] H. Bacakoglu and M. S. Kamel, "A three-step camera calibration method", *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*, vol. 46, no. 5, pp. 1165-1172, 1997.
- [5] F. Pedersini, A. Sarti, and S. Tubaro, "Multi-camera systems", *IEEE Signal Processing Magazine*, pp. 55-65, 1999.
- [6] W. H. Press, B. P. Flannery, S. A. Teukolsky, and W. T. Vetterling, *Numerical Recipes in C*, Cambridge Univ. Press, 1988.



박 중 조

1957년 3월 21일생. 1981년 고려대 전기공학과 졸업. 동대학원 석사(1983), 동대학원 박사(1995). 1996년~현재 경상대학교 전기전자공학부 부교수. 관심분야는 컴퓨터비전, 생체인식, 퍼지 및 신경망 응용.



탁 영 봉

1952년 10월 28일생, 1975년 인하대 전자공학과 졸업. 동대학원 석사(1979), State Univ. of Ghent (Belgium) 박사(1983). 1984~1991년 LG전선연구소 책임연구원, 1991년~현재 경상대학교 전기전자공학부 교수. 관심분야는 컴퓨터비전, 광통신.

퓨터비전, 광통신.