

## 레이저 슬릿광을 이용한 3차원 계측 장치에 관한 연구

(A Study for the 3-Dimensional Measurement System  
using Laser Slit-Ray)

金 善 一\* 鄭 在 紋\*\* 梁 潤 模\*\*\*

(Seon Il Kim, Jae Moon Chung, and Yoon Mo Yang)

## 要 約

레이저 슬릿광(Slit-Ray)과 카메라를 이용하여 3차원 계측 시스템을 개발하고 정밀교정 기법을 제안하였다. 교정은 교정대와 교정 블록(block) 및 로봇트를 이용하여 실시되었다. 측정상의 오차를 줄이기 위해 교정점은 최소 필요갯수 이상으로 채집하여 최소자승 오차법을 써서 해를 구하였다. 대상물이 카메라의 한 화면 크기를 초과할 경우에도 연속 측정이 가능하며 이를 로봇트에 장착시켜 타이어의 윤곽을 재는데 사용하여 그 효용성을 입증하였다.

## Abstract

3 Dimensional measurement system using camera and laser slit-ray is studied. Precise calibration technique in this system is suggested. Calibration is accomplished with calibration die, calibration block and robot. For obtaining calibration parameters, the equations are solved using least square error method from a great many calibration points to reduce measuring error. Continuous measurement is possible for the object which is larger than one frame of camera. The efficiency and usability are proved by applying to the tire profile measuring system which measures tire profile using robot and this system.

## I. 서 론

레이저와 카메라를 이용하면 비접촉으로 3차원 측정 및 거리 판정이 가능하다. 카메라를 이용한 거리 판정에는 2대의 카메라를 이용하는 방법과 structu-

red light를 이용하는 방법이 있다. 2대의 카메라를 사용하는 경우에는 한쪽 카메라의 임의의 점이 다른 쪽 카메라의 어느 점에 해당하는가 하는 연관 관계를 알아내기가 쉽지 않다는 문제점이 있다. 즉 3차원 상에서 동일 좌표인 임의의 지점이 서로 다른 2대의 카메라 좌표계에서는 서로 다른 좌표로 나타나므로 어려움이 있다. 그러나 structured light를 이용하면 이 문제가 쉽게 해결되며 특히 레이저 슬릿광을 사용하면 다른 광선과 뚜렷이 구별되어져서 영상 처리가 단순해진다는 잇점이 있다. 이러한 시스템을 구성하면 3차원 형상의 인식<sup>[1]-[4]</sup> 및 측정이<sup>[5]-[9]</sup> 가능하다.

본 논문은 전체적으로 자동차용 타이어의 윤곽 (sidewall 및 tread) 측정을 위한 레이저 슬릿광을

\*正會員, 巨濟專門大學校 電子科  
(Dept. of Electronics Geoje Junior College.)

\*\*正會員, 日本 九州工業大學校 情報工學部  
(Faculty of Comp. Sciencs & Sys. Eng., Kyushu  
Inst. of Tech.)

\*\*\*正會員, 高麗大學校 情報工學科  
(Dept. of Information Eng., Korea Univ.)

接受日字: 1991年 2月 7日

이용한 3차원 계측 장치의 구현에 관해 서술하였고, 세부적으로는 이 과정에서 얻은 교정 실시 방법의 노하우에 관해서 서술하였다. 교정 위치를 변화시키면서 반복 행렬을 구하고 각 변환 행렬을 이용하여 구한 거리 데이터의 평균과 표준편차, 최대치를 제시하고 화소 위치의 변화에 따른 3차원 공간 좌표값의 변화와 해상 거리를 구하였다. 또한 결과치를 비교 검토하여 본 교정 기법의 정밀성을 재고하였다.

타이어는 금속등과는 달리 모양이 금형대로 나오지 않는다. 따라서 이런것을 고려하여 금형을 설계하게 된다. 타이어는 입력을 받았을 때 변형을 일으키고 이런 변형의 정도를 측정하는 것이 상당히 중요한 일이다. 그러나 기존의 접촉식 측정 방법은 물성이 약한 타이어에 변형을 일으키게 되므로 정확한 측정 자체가 이루어질 수 없다. 따라서 비접촉 타이어 측정 장치가 필요하였고 이를 위하여 카메라 레이저 및 로봇트를 이용해서 3차원 비접촉 측정 장치를 구성하게 되었다. 그러나 레이저 슬릿광을 이용한 3차원 계측 장치는 그 자신 만으로는 시야의 한계성이 존재하므로 로봇트에 탑재하여 연속 촬영하고 각 화면의 결과 데이터를 이어서 전체적인 타이어 측정 결과를 출력하게 된다. 타이어는 이 시스템의 가장 이상적인 측정 대상이라 할 수 있다. 타이어의 바탕색은 흑색으로 빛의 반사가 거의 없으므로 낮은 조명 상태에서 레이저 슬릿광이 비친 부분과 그렇지 않은 부분 사이에 큰 명암 대비를 얻을 수 있어서 잡음에 대한 대책이 필요 없으므로 본 논문에서는 고려하지 않았다.

## II. 시스템 구성

본 시스템은 크게 감지부와 이동부로 나눌 수 있다. 감지부는 그림1과 같이 레이저와 카메라로 구성된다. 레이저 광은 단색성이며 발산성이 적고 밀집성이 높은 특징이 있어 멀리 가더라도 잘 퍼지지 않으므로 그 이용이 점차 다양해지고 있다. 시판되는 레이저는 출력 분포가 비교적 고른 multi mode와 출력 분포가 중 모양을 나타내는 gaussian mode가 있으며 광선의 중앙을 비교적 쉽게 찾아낼 수 있는 gaussian mode를 선택하였다. 본 연구에서는 632.8 nm의 파장을 지니는 3mW 출력의 He-Ne 레이저를 사용하였고 광선을 부채꼴 모양으로 퍼서 평면광을 만들기 위해서 원통 렌즈를 사용하였다. 사용된 원통 렌즈는 입력 광선을 44°의 각을 가지는 부채꼴 모양으로 퍼준다. 레이저는 대상물에 대해 직각으로 조사되고 카메라가 약 35° 각도를 이루고 이를 입력

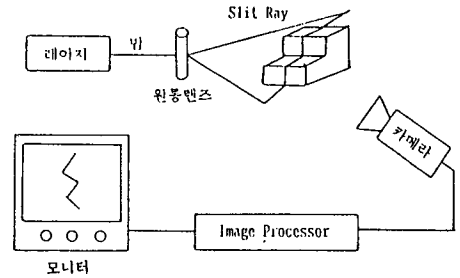


그림 1. 감지부의 구성

Fig. 1. Configuration of sensor part.

시킨다. 보통 슬릿광을 이용하여 감지부를 구성할 때 카메라를 대상물에 대해서 직각이 되게 하고 슬릿광을 비스듬한 위치에서 조사시키나 본 연구에서는 원하는 위치를 정밀하게 측정하기 위해서 이를 거꾸로 구성하였다. 예를 들어 타이어의 tread를 측정할 경우에 슬릿광이 비스듬하게 조사된다면 그림 2와 같이 tread의 움푹 들어간 부분은 원하지 않는 부위가 측정되게 되므로 바람직스럽지 못하다.

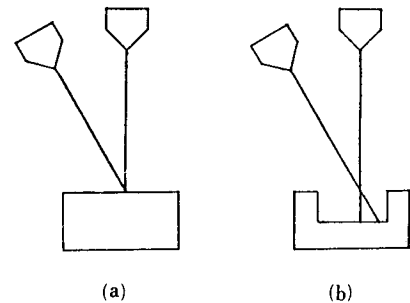


그림 2. 높이가 다른 물체에 대한 슬릿광의 각도에 따른 광선 도달 위치의 변화  
(a) 일정한 높이 (b) 다른 높이

Fig. 2. Change of location of ray arrival for the object which has different height.  
(a) constant height, (b) different height.

이동부는 감지부의 위치를 잡아주기 위해 x-y table에 z축을 세우는 형태의 직교 좌표형으로 구성하였으며 z축에 횡축을 연결시키고 그 끝에 그림3과 같이 2자유도를 갖는 손목을 연결하고 손목 끝에 감지부를 부착하였다. 이동부는 총 5자유도를 갖는 직교 좌표형 로봇트로서 3차원 물체의 어떤 면이라도 자유로이 계측할 수 있게 해 준다.

로봇트를 이용하여 자동 교정을 실시하고 궁극적

으로는 타이어 윤곽 측정을 실시한다. 따라서 소형 승용차 타이어에서 대형 버스용 타이어까지 측정할 수 있도록 설계되었으며 손목에는 harmonic drive 를 장착시켜 정도 향상을 꾀하였다.

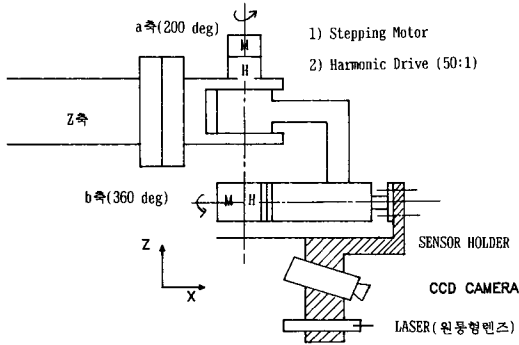


그림 3. 로봇의 손목 및 감지부  
Fig. 3. Robot arm and sensor part.

### III. 정보 추출

#### 1. 중심선 추출

일정한 두께를 가지고 있는 레이저 광선을 원통 렌즈를 이용하여 부채꼴로 만들었을 때 이를 슬릿광 이라고 부르며 이를 대상물에 조사하면 가는 선이 나타난다. 슬릿광을 교정 블록에 조사시켜 계조도를 높이로 바꾸어서 그림4에 나타내었다. 교정 블록은 검은 색이므로 레이저 슬릿광이 닿은 부분과 그렇지 않은 부분이 확연히 구분된다. 그리고 타이어도 검은 색이므로 타이어에 조사했을 경우에도 같은 현상이 관찰된다. 레이저 광선이 종 모양의 출력 분포를 가지고 있으므로 슬릿광도 같은 분포를 가지고 있다. 따라서 그 줄에서 계조도가 최대인 점을 선택하여 중심선으로 결정하는 가장 단순하고도 쉬운 방법이 신뢰도를 충분히 지니게 된다. 카메라의 조리개를 필요 이상으로 열거나 대상물이 흰 물체라면 번짐 현상이 생겨서 종 모양의 계조도 분포를 상실하게 되므로 세심한 주의가 필요하다. 중심선을 검출하는 방법으로 적분 개념이 포함된 GWS (gray-weighted skeleton)<sup>[10]-[11]</sup>를 적용해 보았으나 첫째, GWS' 실시 후에도 선폭이 존재하며 둘째, 선단에서의 분기 현상이 생긴다. 이 문제점을 해결하려면 정보의 손실이 발생한다. 따라서 배경과의 contrast가 최대한 보장되며 계조도 분포가 종 모양일 경우 최대점 검출 방법이 가장 빠르고 정보의 손실이 적은 방법으로 고려된다.<sup>[12]</sup>

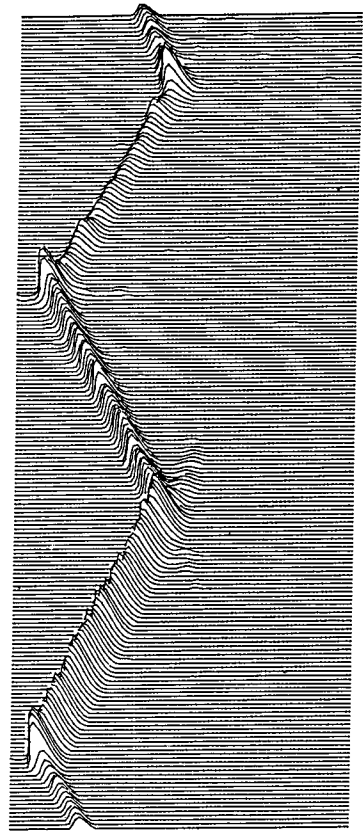


그림 4. 교정 블록에 슬릿광을 조사했을 경우의 계조도 분포

Fig. 4. Gray level distribution when slit-ray is projected to the calibration block.

#### 2. 교정

여기서 교정이라 함은 3차원 공간상의 임의의 좌표와 카메라의 센서에 형성되는 2차원 영상 좌표 사이의 대응 관계를 구하는 것을 말한다. 다시 말하면 영상 좌표계에서 구해지는 한 화소의 좌표가 3차원 공간 좌표상에서는 어떤 좌표값을 가지는 점인가 하는 관계를 구하는 것을 의미한다.

##### (1) 카메라계의 교정식

공간상의 한점  $P(x, y, z)$ 가 카메라 영상면에 맺힐 때 그 영상 좌표가  $P'(U, V)$ 로 나타난다면  $P'$ 을 동차 좌표계 (homogeneous coordinate)로 표현했을 때  $(u, v, h)$ 로 표현되고<sup>[13]</sup>

$$U = u/h \tag{1}$$

$$V = v/h \tag{2}$$

로 관계 지어진다.

P와 P'은

$$[x \ y \ z \ 1] \ T = [u \ v \ h] \quad (3)$$

$$T = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} \end{bmatrix} \quad (4)$$

로 관계식이 형성되고 식(3)과 식(4)로 부터

$$C_{11}x + C_{21}y + C_{31}z + C_{41} = u \quad (5)$$

$$C_{12}x + C_{22}y + C_{32}z + C_{42} = v \quad (6)$$

$$C_{13}x + C_{23}y + C_{33}z + C_{43} = h \quad (7)$$

를 유추할 수 있다.

식(1)과 식(2)를 식(5)와 식(6)에 각각 대입하면

$$C_{11}x + C_{21}y + C_{31}z + C_{41} = hU \quad (8)$$

$$C_{12}x + C_{22}y + C_{32}z + C_{42} = hV \quad (9)$$

식(7)을 식(8)과 식(9)에 대입하여 정리하면

$$\begin{aligned} C_{11}x + C_{21}y + C_{31}z + C_{41} - C_{13}Ux - C_{23}Uy - C_{33}Uz - \\ C_{43}U = 0 \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} C_{12}x + C_{22}y + C_{32}z + C_{42} - C_{13}Vx - C_{23}Vy - C_{33}Vz - \\ C_{43}V = 0 \end{aligned} \quad (11)$$

식 (10)과 식(11)로 부터 변환 행렬 T와 x, y, z를 미 리 알고 있다면 그에 해당되는 영상 좌표를 구할 수 있 다. T를 모르는 경우에는 식이 2개 미지수가 12개 이므 로 최소한 6개 이상의 데이터 (U, V, x, y, z)가 필요하다. C<sub>43</sub>=1인 경우에는 5.5개 이상의 데이터가 필요하다.

변환 행렬 T와 영상 좌표 U, V를 알고있다 하더 라도 그에 해당되는 3차원 공간상의 좌표 x, y, z는 구할 수 없다. 미지수가 3개 식이 2개 이므로 식(10) 과 식(11)에 하나의 식을 더 추가시켜야 한다. 따라서 카메라를 추가시키거나 슬릿광을 사용하게 된다.

(2) 슬릿광의 방정식

슬릿광은 공간상에서 2차원 공간을 형성한다. 그 러므로 평면의 방정식으로 나타낼 수 있다. 한 평면 은 3개의 점에 의해 결정되며 그 방정식은

$$[x \ y \ z \ 1] \ \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \end{bmatrix} = 0 \quad (12)$$

(3) 카메라와 슬릿광이 결합되었을 때의 변환 행렬 카메라와 슬릿광을 사용하면 식(3), 식(4), 식(12)를 결 합하여

$$[x \ y \ z \ 1] \ \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & a_1 & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & a_2 & C_{23} \\ C_{31} & C_{32} & a_3 & C_{33} \\ C_{41} & C_{42} & a_4 & C_{43} \end{bmatrix} = [u \ v \ 0 \ h] \quad (13)$$

로 쓸 수 있다. 식(13)의 양변을 h로 나누고 식(1), (2) 를 대입하여 정리하면

$$\begin{aligned} [x/h \ y/h \ z/h \ 1/h] \\ = [u/h \ v/h \ 0 \ 1] \ \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & a_1 & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & a_2 & C_{23} \\ C_{31} & C_{32} & a_3 & C_{33} \\ C_{41} & C_{42} & a_4 & C_{43} \end{bmatrix}^{-1} \\ = [X \ Y \ H \ Z] = [U \ V \ 0 \ 1] \ \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & a_1 & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & a_2 & C_{23} \\ C_{31} & C_{32} & a_3 & C_{33} \\ C_{41} & C_{42} & a_4 & C_{43} \end{bmatrix}^{-1} \\ = [U \ V \ 1] \ \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (14)$$

이며 [U V 0 1]에서 0이 의미를 가지지 못하므로 제 거시켰다.

식(13)과 식(14)로 부터

$$X - xH = 0 \quad (15)$$

$$Y - yH = 0 \quad (16)$$

$$Z - zh = 0 \quad (17)$$

식 (14)로 부터 X, Y, Z, H에 대한 방정식을 끌어내 어 식(15), 식(16), 식(17)에 각각 대입하면

$$m_{11}U + m_{21}V + m_{31} - x(m_{14}U + m_{24}V + m_{34}) = 0 \quad (18)$$

$$m_{12}U + m_{22}V + m_{32} - y(m_{14}U + m_{24}V + m_{34}) = 0 \quad (19)$$

$$m_{13}U + m_{23}V + m_{33} - z(m_{14}U + m_{24}V + m_{34}) = 0 \quad (20)$$

m을 미지수로 하면 m<sub>34</sub>=1로 정했을 때 미지수는 11 개가 되고 식은 3개 이므로 적어도 4점에 대한 공간 상의 3차원 좌표값과 그에 해당되는 영상 좌표값을 알면 m을 구할 수 있다. 그 중 3용개의 데이터만 사용해도 m을 구할 수 있다. 이것을 행렬로 표현하 면

$$\begin{bmatrix} U_1 & V_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -U_1x_1 - V_1y_1 \\ 0 & 0 & 0 & U_1 & V_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & -U_1y_1 - V_1y_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & U_1 & V_1 & 1 & -U_1z_1 - V_1z_1 \\ U_2 & V_2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -U_2x_2 - V_2y_2 \\ 0 & 0 & 0 & U_2 & V_2 & 1 & 0 & 0 & 0 & -U_2y_2 - V_2y_2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & U_2 & V_2 & 1 & -U_2z_2 - V_2z_2 \\ U_3 & V_3 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -U_3x_3 - V_3y_3 \\ 0 & 0 & 0 & U_3 & V_3 & 1 & 0 & 0 & 0 & -U_3y_3 - V_3y_3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & U_3 & V_3 & 1 & -U_3z_3 - V_3z_3 \\ U_4 & V_4 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -U_4x_4 - V_4y_4 \\ 0 & 0 & 0 & U_4 & V_4 & 1 & 0 & 0 & 0 & -U_4y_4 - V_4y_4 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} m_{11} \\ m_{21} \\ m_{31} \\ m_{12} \\ m_{22} \\ m_{32} \\ m_{13} \\ m_{23} \\ m_{33} \\ m_{14} \\ m_{24} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \\ x_2 \\ y_2 \\ z_2 \\ x_3 \\ y_3 \\ z_3 \\ x_4 \\ y_4 \end{bmatrix} \quad (21)$$

식(21)을

$$RM = W \quad (22)$$

로 표현하고 3쌍개 이상의 데이터를 교정용으로 확보한다면 pseudo-inverse 방법에 의해 최소자승오차를 지닌 결과를 얻을 수 있다. 즉

$$M = (R'R)^{-1}R'W \quad (23)$$

로 변환 행렬 M을 구할 수 있다.

(4) 3차원 정보 계산

일단 M이 결정되면 영상 좌표계에 나타나는 임의의 한 점의 좌표 U, V를 알 때 그에 대응되는 3차원 공간상의 한점의 좌표 x, y, z를 알 수 있다. 즉 식(18), 식(19), 식(20)으로부터  $m_{34}=1$ 로 정했을 때

$$x = (m_{11}U + m_{21}V + m_{31}) / (m_{14}U + m_{24}V + 1) \quad (24)$$

$$y = (m_{12}U + m_{22}V + m_{32}) / (m_{14}U + m_{24}V + 1) \quad (25)$$

$$z = (m_{13}U + m_{23}V + m_{33}) / (m_{14}U + m_{24}V + 1) \quad (26)$$

로 x, y, z가 결정된다.

IV. 교정 실험

변환행렬 M을 구하기 위해서는 먼저 3차원 공간상에서의 한 점의 좌표값을 정확히 알고 그에 대응되는 영상 좌표상의 값을 정확히 알아야 하며 이와

같은 데이터가 적어도 4점 이상에 대해 얻어져야 한다. 정확히 측정되지 않으면 변환 행렬 자체에 오차가 스며들게 되고 결국에 3차원 계측 오차에 결정적인 영향을 미치게 된다.

3차원 계측에 영향을 미치는 오차의 원인은 카메라의 영상좌표상의 화소의 크기 변화, 즉 화소의 크기가 얼마나 하는 것과 렌즈의 초점거리, 카메라의 방향과 좌표축의 평행성, 카메라와 레이저 사이의 거리의 측정 오차, 레이저 위치의 편차에 기인한다. 그 중에서도 주로 영향을 끼치는 것은 외부적인 요인 즉, 카메라의 각도, 레이저와의 거리 레이저의 위치 편차 등이다.<sup>[15]</sup> 카메라와 레이저를 물리적으로 모델링 했을 경우에는 위에 열거한 오차 요인이 모두 적용되며 여기에 렌즈의 뒤틀림도 고려되어야 한다.<sup>[16]</sup> 변환 행렬을 사용하면 모델링이 필요없어 지므로 모델링상의 계측 오차에 의한 오차의 여지는 없어진다. <sup>[17]</sup> 그러나 이 경우에는 교정이라고 하는 2차원 영상 좌표와 3차원 공간 좌표 사이의 변환 행렬을 얼마나 정확히 구하느냐 하는 것이 큰 문제로 부각된다. 즉 영상 좌표상의 한 점이 공간 좌표상의 점과 일치하느냐 하는 문제로 귀결되는데 일치 정도는 공간 좌표 측정의 정밀성에 기인하는 바가 크다. Stereo Vision에서는 정육면체를 교정물로 사용하여 꼭지점의 위치를 영상 좌표상에서 구하고 공간 좌표는 측정에 의해 구하기도 한다.<sup>[18]</sup> 구체적인 교정 기법에 대해서는 대개 언급을 회피하고 있다. 본 연구에서는 다음 3가지 원칙이 적용되는 교정 기법을 제안하고자 한다.

1. 교정점의 공간 좌표를 정확히 구하여야 한다.
2. 공간 좌표상의 교정점과 영상 좌표상의 교정점이 일치하여야 한다.
3. 공간상의 Z축은 중력이 가리키는 축과 같은 축으로 한다.

교정점의 공간 좌표를 정확히 구하기 위해서는 먼저 교정물이 정밀하게 제작되어야 한다. 본 연구에서는 정확한 교정을 위하여 교정 블록을 제작하였으며 제작된 교정 블록을 한국기계연구소 표준실에서 검증하여 교정물의 정밀성을 기하였다. 교정물이 정밀하게 제작되었다더라도 교정물을 얹어 놓는 곳이 기울어졌다거나 면이 고르지 않다면 위치 측정이 정확히 이루어지지 못한다. 따라서 교정 블록을 기울지 않고 얹어 놓을 수 있는 교정대를 제작하였다. 교정대의 각 받침 다리는 각각 독립적으로 높이 조절이 가능하게 제작하여 수준기를 사용하여 교정대의 X축 Y축 수평을 맞추었다. 교정대의 바닥면은 고르게 가공되었다. 교정대 위에는 흰 종이를 부착시키고

로봇을 이용하여 모눈을 그음으로써 모눈의 선 방향과 로봇의 축의 이동 방향을 일치시켰다. 교정 블록은 폭이 일정한 계단을 형성하고 서로 엇갈리는 형태의 계단을 두 줄 배열시켜 상황에 따라 선택해 쓸 수 있도록 하였으며 8각형으로 제작하여 계단의 방향을 선택할 수 있도록 하였다. 계단은 모서리에서 90도로 모가 나므로 정육면체의 모서리 보다 컴퓨터가 인식하기에 유리하다. 중앙에 수직선을 그어 레이저의 수직 교정에 사용하였다. 레이저가 수직 교정되면 레이저 슬릿광이 Z축과 평행하다. 전체적인 모양은 그림5와 같다.

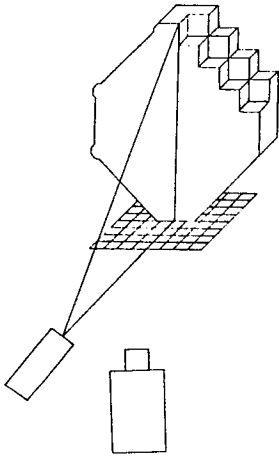


그림 5. 교정 블록과 슬릿광의 수직 교정을 위한 교정 블록 설치

Fig. 5. Calibration block and install of calibration block for vertical calibration of slit-ray.

3차원 공간 좌표계는 로봇의 physical home을 원점으로 잡았다. 로봇은 수직 수평을 맞추어서 바닥에 고정시키고 교정대도 정확한 위치에 고정시켰다. 따라서 교정대의 공간 좌표값은 로봇을 이동시켜 로봇의 일부를 교정대와 일치시키고 그때의 좌표값과 로봇의 제원을 이용하여 구할 수 있다. 이렇게 교정대의 설치가 완료되면 교정대 위의 모눈에 교정 블록을 설치할 경우 교정 블록의 위치 및 교정 블록 내의 각 계단들의 위치는 쉽게 계산된다. 다음으로 레이저 슬릿광 발생 장치를 로봇 손목에 장착된 감지부에 설치할 때 두 가지 교정을 실시하여야 한다. 즉 레이저 슬릿광의 평행 교정과 수직 교정이다. 평행 교정이란 슬릿광의 진행 방향이 로봇 Y축과 평행하도록 레이저 슬릿광 발생 장치

를 설치하는 것이다. 이 작업이 이루어지지 않을 경우에 계측 대상물에 레이저 슬릿광을 비출 때에 조사 각도에 대한 기준 각도가 없게 되므로 필히 해주어야 하는데 그림6과 같이 레이저 슬릿광의 축이 교정대 위에 그려진 모눈 종이의 한 축과 일치 또는 평행을 이루도록 하면 가능하다.

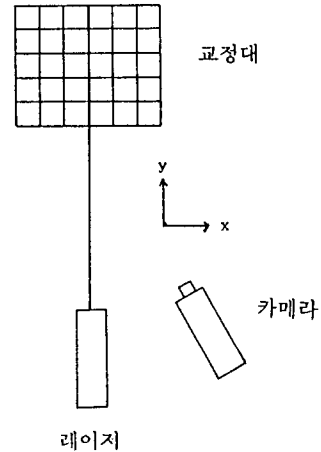


그림 6. 교정대를 이용한 레이저 슬릿광의 평행 교정  
Fig. 6. Calibration of paralleling of a laser slit-ray using calibration die.

수직 교정이란 레이저 슬릿광 평면의 수직성을 교정하는 것으로 그림5와 같이 교정대 위에 교정 블록을 설치하고 슬릿광이 교정 블록에 그리는 직선이 교정 블록에 그려진 수직선과 일치 또는 평행하도록 슬릿광 발생 장치를 조정한다. 이 작업이 이루어지지 않으면 슬릿광의 수직 및 수평에 대한 기준값이 없으므로 수직 및 수평을 보장받을 수 없다. 여기서 수평이란 수증기의 공기 방울이 가운데에 위치하는 경우를 가리키며 수직이란 이 수평과 직각을 이루는 경우를 말한다. 레이저 슬릿광의 수직 교정과 수평 교정이 끝나면 레이저 슬릿광이 공간상에서 형성하는 면이 Y-Z축이 이루는 면과 평행하게 되므로 슬릿광이 닿는 곳의 X좌표는 선 상의 어느 점이라도 동일하게 된다. 카메라 및 레이저가 로봇에 의해 Z축을 중심으로 90도 회전했을 경우에는 Y 좌표가 동일하게 된다. 따라서 대상 물체가 카메라의 가시 영역을 벗어나는 큰 물체의 경우 로봇에 의해 Y축 또는 X축으로 이동시켜서 같은 X축 또는 Y축에 대해 연속해서 측정을 할 수 있다. 이 작업이 끝나면

감지부의 변환 행렬을 구하기 위한 교정을 실시하여야 한다. 이를 위해 교정 블록을 교정대 위에 올려 놓고 그림7과 같이 슬릿광을 조사한다. 이 때 카메라에 입력되는 영상은 그림8과 같이 나타난다. 교정 블록의 치수는 이미 알고 있으며 교정대의 위치도 알고 있으므로 교정 블록의 각 계단의 위치는 쉽게 알 수 있다. 그림8에서 각 계단의 모서리 부분의 영상 좌표계에서의 위치를 구하면 그에 대응되는 3차원 공간상의 위치를 알고 있으므로 변환 행렬이 계산되어 진다. 영상 좌표계에서의 모서리 부분의 좌표는 곡률 극대점 추출 방법을 사용하면 구할 수 있다. 점  $P_i(X_i, Y_i)$ 에서의 곡률  $C_{ik}$ 는<sup>(14)</sup>

$$C_{ik} = \frac{X'Y'' - Y'X''}{(X'^2 + Y'^2)^{3/2}} \quad (27)$$

$$X' = (X_{i+k/2} - X_{i-k/2}) / (S_{i+k/2} - S_{i-k/2}) \quad (28)$$

$$X'' = (X_{i+k} - X_i) / (S_{i+k} - S_i) - (X_i - X_{i-k}) / (S_i - S_{i-k}) \quad (29)$$

$$S_i = \sum_{t=1}^i \{ (X_t - X_{t-1})^2 + (Y_t - Y_{t-1})^2 \}^{1/2} \quad (30)$$

$Y', Y''$ 도 식(28), 식(29)에서  $X$ 대신에  $Y$ 를 넣으면 구해진다.

$P_i(X_i, Y_i)$ 에서의 최대곡률  $C_{im}$ 는

$$C_{im} = \max_i C_{ik} | h_1 \leq k \leq h_2 | \quad (31)$$

로부터 계산되어 진다.  $h_1, h_2$ 는 임의의 상수이다.

모든  $i$ 에 대해  $C_{im}$ 을 구하고 그때의 값, 즉  $k_i$ 를 저장해 둔다.

점  $P_i(X_i, Y_i)$ 에서 최대 곡률치가  $C_{im}$ 이고 그 때의  $k=w$ 라고 가정했을 때

$|i-j| \leq w/2$ 인 모든  $j$ 에 대해

$$|C_{im}| > |C_{jm}| \quad (32)$$

( $C_{jm}$ 은  $P_j(X_j, Y_j)$ 에서의 최대 곡률치)

일 경우  $P_i$ 는 곡률 극대점이다. 따라서 교정 블록의 곡률 극대점  $P_i(X_i, Y_i)$ 를 구하면 계단의 모서리 부분이 찾아진다.

### V. 결과 및 고찰

교정 블록을 그림9와 같이 여러 장소에 두고 실험을 실시하였다. 이것은 상대적인 위치로서 실제로는 교정 블록을 1의 위치에 두고 나머지 위치는 로봇의 이동으로 구현하였다. 1의 위치는 CCD 카메라의 CCD 센서로 부터 교정 블록의 기준 위치까지 100mm가 되도록 설정하였다. 나머지 위치는 15mm씩 차이가 난다. 실험 결과는 오차의 평균과 표준

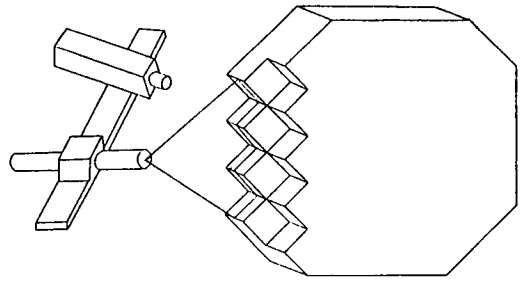


그림 7. 변환 행렬을 구하기 위한 교정 자세  
Fig. 7. Calibration form to solve conversion matrix.



그림 8. 교정 블록에 조사한 슬릿광의 영상  
Fig. 8. The image of slit-ray projected to calibration block.

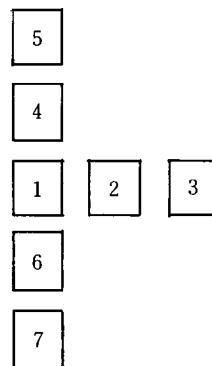


그림 9. 교정 블록의 측정 위치  
Fig. 9. Measuring location of calibration block.

편차, 오차의 최대치를 구하였다. 표1에 결과 데이터가 나타나 있다. 이 데이터를 그림10에 도표로 나타내었다. 이 표의 Data Set 항목에서 1이라 함은 그림9의 교정 블록 측정 위치에서 1의 위치에 교정 블록을 두고 변환 행렬을 구하였음을 의미한다. CLOSE이면 해당 위치에서 구한 변환 행렬을 이용하여 해당 위치에서 측정한 결과이고 OPEN이면 그 외의 위치에서 측정한 결과이다. 예를 들어 Data Set 1에서 CLOSE이면 교정 블록을 1의 위치에 두고 변환행렬을 구한 후 1의 위치에 있는 교정 블록에 대해 계측한 결과이며 OPEN이면 그 외의 위치, 즉 2, 3, 4, 5, 6, 7의 위치에 대한 계측 결과이다. Data Set 1 2 3이면 교정 블록을 1, 2, 3의 위치에 두고 변

표 1. 절대 위치 계측 오차

Table 1. Errors for absolute position measurement.

Data Set		OPEN			CLOSE		
		평균	표준편차	최대치	평균	표준편차	최대치
1	Y	-0.225	0.219	-1.690	-0.037	0.007	-0.148
	Z	0.038	0.177	-1.080	-0.005	0.000	-0.012
2	Y	-0.197	0.379	-2.127	0.165	0.007	0.321
	Z	-0.159	0.290	-1.399	0.023	0.000	0.034
3	Y	-0.302	0.114	-0.939	0.034	0.005	0.140
	Z	-0.403	0.196	-1.377	0.005	0.001	-0.042
4	Y	0.075	0.233	-1.220	-0.011	0.008	-0.172
	Z	0.537	0.444	1.961	-0.002	0.000	-0.012
5	Y	-0.578	0.448	-2.405	-0.127	0.026	-0.363
	Z	-0.142	0.257	-1.387	-0.017	0.007	-0.156
6	Y	-0.553	0.356	-2.037	0.071	0.008	0.202
	Z	-0.048	0.129	-0.859	0.010	0.000	0.055
7	Y	0.501	0.269	1.818	0.079	0.000	0.106
	Z	-0.349	0.344	-1.731	0.011	0.000	0.013
1 2 3	Y	-0.018	0.058	-0.460	0.074	0.021	0.452
	Z	-0.068	0.044	-0.536	0.015	0.033	-0.353
4 5 6 7	Y	0.050	0.027	0.359	0.042	0.032	0.360
	Z	0.083	0.034	0.437	0.007	0.035	0.418
1 4 6	Y	-0.067	0.062	-0.622	0.066	0.025	0.369
	Z	0.089	0.037	0.390	0.009	0.031	-0.365
1 3	Y	0.022	0.029	-0.348	0.046	0.023	0.378
	Z	0.015	0.057	-0.515	0.007	0.027	-0.312

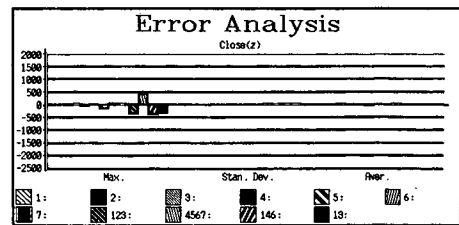
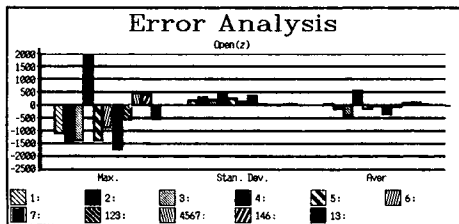
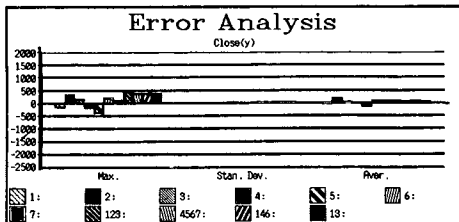
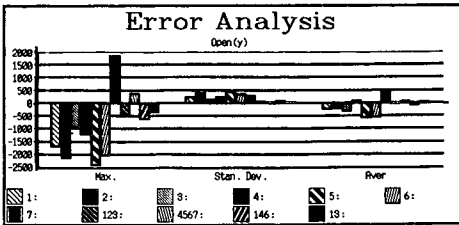


그림 10. 오차 분석 도표  
Fig. 10. Error analysis graph.

환 행렬을 구한 결과이다. 각 위치마다 6개의 점에 대한 데이터가 얻어지므로 총 18개의 점에 대한 데이터가 얻어지고 이를 모두 사용하여 변환 행렬을 구해낸다. 1 2 3의 CLOSE이면 1, 2, 3의 위치에 교정 블록을 두고 변환 행렬을 구한 후 다시 1, 2, 3의 위치에서 계측을 하여 그 오차를 구한 것이고 OPEN이면 그 위의 위치, 즉 4, 5, 6, 7의 위치에 대한 오차 계산 결과이다. 측정 대상에서 X축은 레이저 슬릿광이 닿는 곳이 모두 같은 값을 가지도록 교정되었으므로 제외하였다.

그림10을 보면 CLOSE의 경우 OPEN에 비해 오차가 상당히 작다. 그러나 실제 계측시에는 OPEN이 대부분이다. 그림10에서 보면 한군데에서 교정을 실시하는 것보다는 여러 군데에서 교정을 실시하는 것이 오차를 줄일 수 있는 방법이 됨을 알 수 있다. 따라서 교정 블록을 다양한 위치에 두고 교정 행렬을 구하고 이 행렬 값들로 부터 최소자승법에 의해 사용될 교정 행렬을 구해낸다. 이렇게 구해낸 교정 행렬의 예는 표2와 같다. 표2의 교정 행렬을 이용하면 식(24), (25), (26)으로 부터 3차원 공간상의 좌표를 구할 수 있다.



표 2. 변환 행렬

Table 2. Conversion matrix.

$$M = \begin{bmatrix} 0.433552 & 0.174613 & -0.013240 & -0.001895 \\ -0.011796 & -0.006704 & 0.105696 & 0.000052 \\ -228.750 & -167.155692 & -19.047828 & 1.0 \end{bmatrix}$$

U=240에 V는 0부터 511까지 변화시키면서 3차원 좌표값을 구하고 한 화소의 변화에 대한 3차원 공간 좌표값 변화, 즉 해상 거리를 구하여 그림11의 a, b에 나타내었으며 그 두 데이터를 c에 같이 나타내었다. 그림12에서는 V=255로 고정시키고 V를 0에서 479

까지 변화시키면서 좌표값을 구하여 나타내었다. 각 그림마다 Y축의 Scale이 다름에 주의하여야 한다.

U가 변화할 때의 각 좌표값의 변화를 보면 대략 400이상이 되면 급격히 변화한다. 따라서 해상 거리도 당연히 급변하게 된다. 그림11의 a의 Y 좌표값으로부터 이 시스템의 거리 측정 범위를 알 수 있다. Z값으로 부터는 카메라가 X-Y 평면과 평행하지 않음을 알 수 있다. 본 연구에서는 측정 범위가 50mm 안팎이고 상당히 작은 해상 거리를 요구하는 시스템을 제작하였기 때문에 광각 렌즈를 사용하였다. 따라서 그림11과 같은 곡선을 나타낸다. 초점 거리가

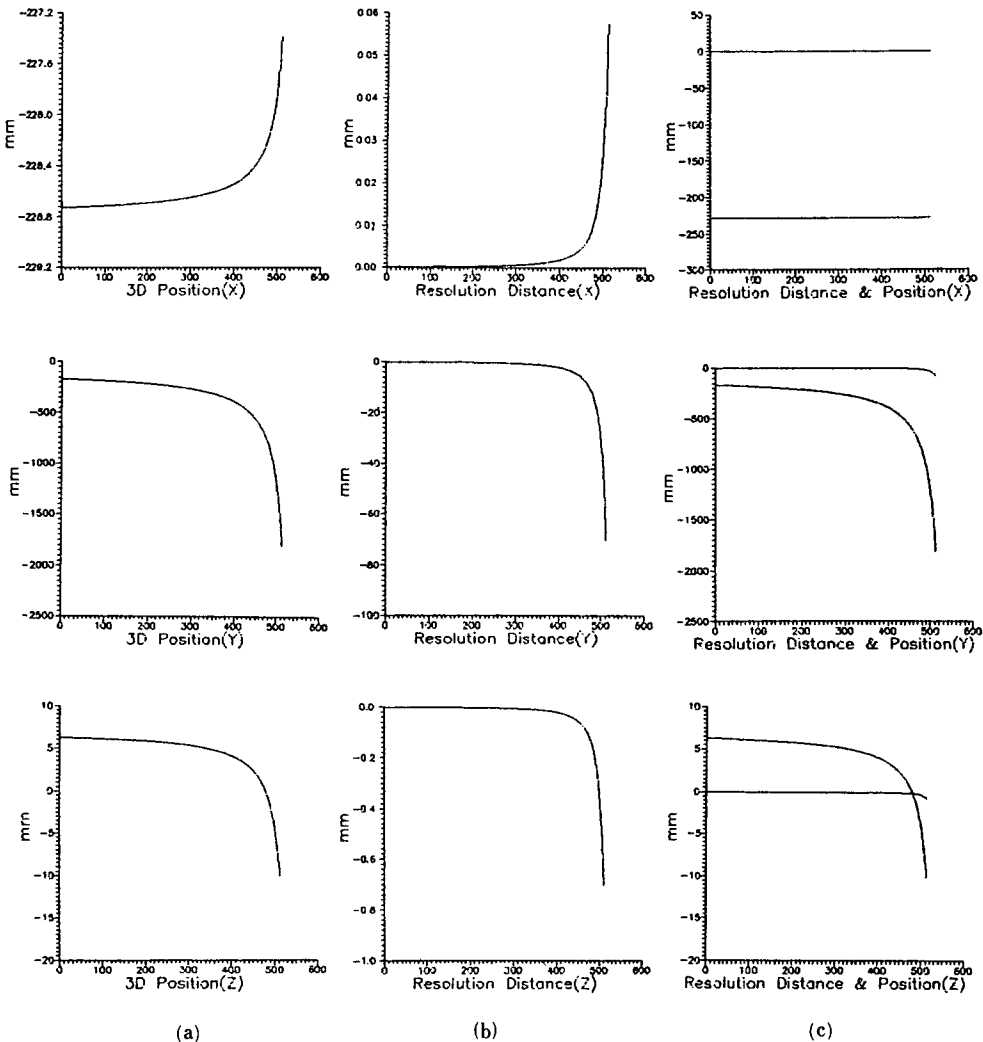


그림11. v=240, U=0~511일 때의 각 축 3차원 좌표값 및 해상거리도

Fig. 11. Graphs for the 3-D spatial data & resolution distance for each axis at V=240, U=0~511.

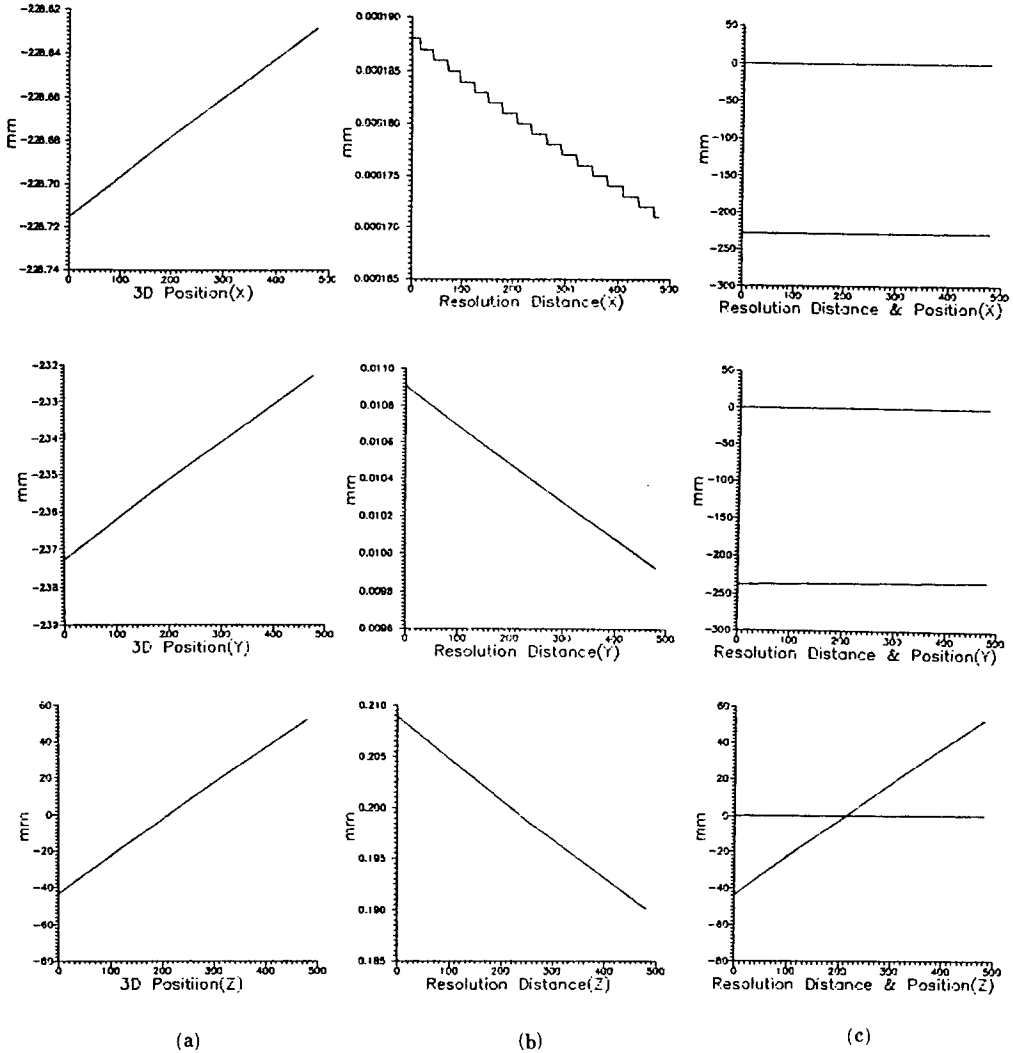


그림 12.  $U=255, V=0\sim 479$ 일 때의 각 축 3차원 좌표값 및 해상거리도  
 Fig. 12. Graphs for the 3-D spatial data & resolution distance for each axis at  $U=255, V=0\sim 479$ .

긴 렌즈를 사용하면 곡선의 휨이 훨씬 완만하게 나타난다. 이것은 Mansbach<sup>[16]</sup>의 식과 일치한다. 해상거리가 증가하면 오차도 증가할 것이므로 카메라에서 받아들인 영상에 적절한 window를 씌워서 이용하는 것이 바람직하다.

V가 변화할 때의 변화를 보면 좌표값이나 거리해상도나 거의 직선적으로 변화함을 알 수 있다. 거리해상도는 V가 증대함에 따라 감소하고 있다. 따라서 각 축의 좌표값은 실제로 직선의 아니지만 거리해상도 감소가 아주 미미하므로 직선처럼 나타난다.

Mansbach<sup>[16]</sup>는 카메라를 기하학적으로 모델링하고 모델의 계수들을 측정에 의해 구한 다음에 각 계수를 차례로 변환시키면서 최소자승값이 최소가 되는 계수를 구하여 이를 토대로 거리를 계측하였는데 시야의 중앙에서 측정된 값이 350mm 거리에서 2mm의 오차를 기록하고 있다. 이를 백분율로 나타내면 0.57%이다.

Inshimatsu<sup>[19]</sup>는 변환 행렬을 이용하여 거리 측정을 하였으며 목표물로부터 400mm 떨어진 거리에서 2mm의 오차를 기록하고 있는데 이는 0.50%의 오차율이다.

본 연구에서는 표1과 같이 측정하였을 때 Y가 거리를 나타내는데 CLOSE의 경우는 실제로 발생할 확률이 적고 측정시에는 모든 상황이 OPEN에 해당된다. 따라서 OPEN의 123이나 4567, 146, 13을 선택하였을 때 어느 것을 선택하여도 오차의 크기가 최대 0.62%를 넘지 않으며 최소 0.35%까지 존재한다. 이것은 그림9와 같이 목표물이 100mm에도 존재하고 100±30mm에도 존재할 경우를 모두 측정해서 최소 자승오차를 구한 결과이다. 따라서 최소값을 선택할 경우에 Mansbach나 Ishimatsu 보다 우수한 결과를 얻을 수 있다.

이 시스템을 이용하여 교정 블록과 타이어에 대해 3차원 계측을 실시하였다. 타이어의 경우 부피가 커서 한번에 다 측정하기 어려우므로 로봇을 이동시켜서 연속 촬영하였고 이웃하는 화면에 대해 계측된 3차원 좌표값을 기준으로 거리가 가장 가까운 점끼리를 서로 연결하였다. 화면의 가장자리로 갈수록 렌즈에 의한 비틀림 현상이 심하고 화소의 해상도도 떨어지므로 window를 설정하여 화면의 중심 부근의 데이터를 사용하였고 이에 따라 계측 영역이 좁아지는데 이는 로봇의 이동 간격을 더 세밀하게 함으로써 보상하였다.

카메라와 레이저 슬릿광을 이용하여 대상물을 계측하면 카메라의 원점을 기준으로한 3차원 좌표가 계산되는데 이 좌표를 로봇의 physical home을 기준으로 한 절대 좌표로 바꾸어 주어야 한다. 타이어의 sidewall 및 tread 계측시에는 각각 90도의 회전이 수반된다. 따라서 회전량을 보상하고 계측 당시의 로봇 좌표값을 더해주면 3차원 절대 좌표값이

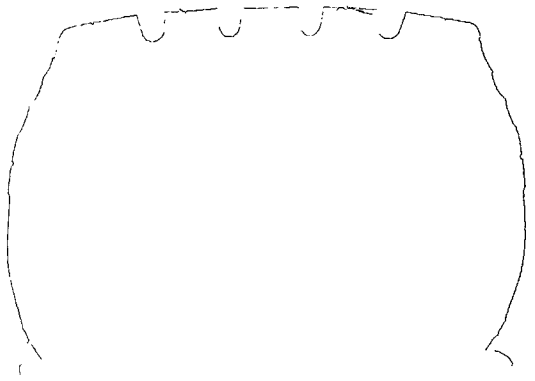


그림14. 트럭 및 버스용 타이어의 윤곽 측정 결과  
Fig. 14. Measured result for truck and bus tire profile.

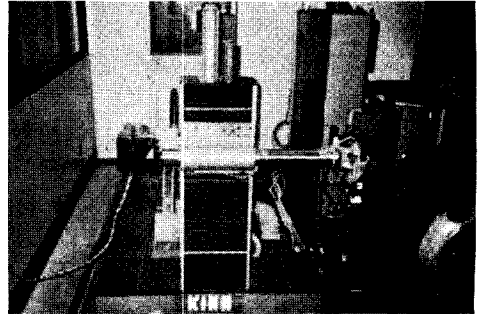


그림15. 비접촉 3차원 계측 시스템  
Fig. 15. Noncontacting 3-dimensional measuring system.

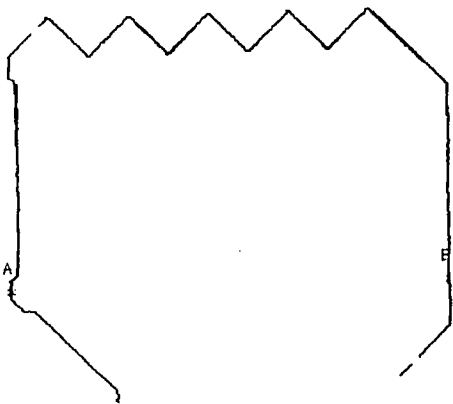


그림13. 교정 블록의 윤곽 측정 결과  
Fig. 13. Measured result for the calibration block profile.

구해진다. 그림13은 교정 블록의 윤곽을 측정하여 plotter로 그린것이다. 그림14는 트럭 및 버스용 타이어의 윤곽을 측정하여 축소한 것이다. 그림15는 이 시스템이 타이어의 윤곽을 측정하고 있는 모습이다.

VI. 결 론

레이저 슬릿광을 이용한 3차원 계측 시스템은 실험 결과 상당히 만족스러운 결과를 얻을 수 있었다. 제안된 교정 기법은 Z축이 중력 방향과 일치하는 3차원 공간좌표를 가정하고 이 좌표계로 출력하는 것을 기준으로 한 기법이다. 따라서 레이저 슬릿광은 Z축과 평행하고 이 레이저 슬릿광을 타이어의 중심

선을 지나가도록 하여 측정하였을 때 정확한 타이어 측정 데이터를 얻을 수 있다. 그리고 로봇의 Z축도 이것과 평행하다고 가정했을 때 카메라를 상하로 이동하였을 때 얻은 데이터들을 연속적으로 잇는 것이 가능하다. 본 연구는 원래 타이어의 tread 및 sidewall의 윤곽 측정을 위해 수행되었으므로 교정 작업도 타이어를 측정할 때 타이어와 카메라 사이의 최대, 최소 거리를 감안하여 100+30mm 이내에서 실시하였고 현재 측정 작업을 훌륭히 수행하고 있다. 타이어는 접촉이 가해지면 물리적 변화가 생겨서 접촉식 측정은 상당한 오차를 근원적으로 안고 있게 된다. 본 연구는 이러한 특수한 목적을 만족시키기 위해 이동 장치로써 로봇을 사용하여 3차원 계측을 수행하였다. 그러나 외부에서 인위적 힘이 가해져서 카메라의 각도가 바뀐다든지 렌즈의 초점거리가 바뀌게 되면 다시 교정을 실시하여야 하며 이 과정은 아주 세밀하고도 복잡하며 지루한 작업이다. 또한 이동부는 상당히 덩치가 큰 로봇으로써 가끔 유지 보수가 필요하고 기계적 변형이 생길 수 있으므로 이때에도 교정을 다시 실시하여야 한다. 또한 현재의 가장 심각한 문제점으로는 로봇의 X축과 Y축, Z축이 가정대로 정확히 직교하느냐 하는 것이다. 이러한 문제점 등을 해결하기 위해 보정을 실시하였으나 여기에서는 언급하지 않았다. 앞으로는 이 시스템을 정확히 평가하는 문제와 교정 작업의 자동화, 로봇의 직교성 보정 등에 더 연구가 가해져야 할 것으로 고려된다.

### 參 考 文 獻

- [1] Y. Sato, H. Kitagawa and H. Fujita, "Shape measurement of curved object using multiple slit-ray projections," *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. PAMI-4, no. 6, pp. 641-646, Nov. 1982.
- [2] Y. Shirai, "Recognition of polyhedrons with a range finder" *Pattern Recognition*, vol. 4, pp. 243-250, 1972.
- [3] M. Oshima and Y. Shirai, "Object recognition using three-dimensional information," *Proc. 7th Int. Joint Conf. Artif. Intell.*, pp. 601-606, 1981.
- [4] R.C. Bolles and M.A. Fischler, "A ransac-based approach to model fitting and its application to finding cylinders in range data," *Proc. 7th Int. Joint Conf. Artif. Intell.*, pp. 637-643, 1981.
- [5] T. Agui, T. Saito and M. Nakajima, "3-D Object data input system using rear view mirrors," *日本電子情報通信學會論文誌*, vol. J70-D, no. 5, pp. 995-1001, 1987. 5.
- [6] K. Araki et al, "Method and its trial instrumentation for 3-D scene measurement," *日本電子情報通信學會論文誌*, vol. J71-D, no. 10, pp. 2059-2068, 1988. 10.
- [7] H. Naruse et al., "High accuracy distance and attitude measurement using slit-ray projection method," *日本電子情報通信學會論文誌*, vol. J69-D, no. 12, pp. 1888-1895, 1986. 12.
- [8] Y.Y. Hung, S. Cheng and N.K. Loh, "A computer vision technique for surface curvature gauging with projected grating," *IEEE Trans. Industrial Electronics*, vol. IE-33, no. 2, May 1986.
- [9] D. Nitzan, A.E. Brain and R.O. Duda, "Measurement and Use of registered reflectance and range data in scene analysis," *Proc. IEEE*, vol. 65, no. 2, Feb. 1977.
- [10] G. Levi and U. Montanari, "A grey-weighted skeleton," *Information and control*, vol. 17, pp. 62-91, 1970.
- [11] K. Shikano et al, "Wave propagation method-A method for conversion of grey pictures into line figures," *日本電子情報通信學會論文誌*, vol. 55-D, no. 10, pp. 668-675, Oct, 1972.
- [12] 김선일, 정재문, 양윤모, 영상계측에 있어서의 정밀도와 그 향상에 관한 연구(I), 한국기계연구소, UCE420-1322. C, 1989.
- [13] D.H. Ballard and C.M. Brown, *Computer Vision*, Prentice-Hall Inc., pp. 481-488, 1982.
- [14] Y.M. Yang, "Model based analysis of line drawings and their applications" Tohoku University, Japan, Doctoral thesis, 1988.
- [15] J.C. Lin and Z. Chi, "Accuracy analysis of a laser/camera based 3-D measurement system," *Proceedings of the 3rd International Conference on Robot Vision and Sensory Controls*, pp. 179-191, Nov. 1983.
- [16] P. Mansrach, "Calibration of camera and light source by fitting to physical model," *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, vol 35, pp. 200-219, 1986.
- [17] C.K. Wu et al, "Acquiring 3-D spatial data of a real object," *CVGIP* 28, pp. 126-133,

1984.

- [18] I. Sobel, "On calibrating computer controlled cameras for perceiving 3-D scenes," Artificial Intelligence 5, pp. 185-198, 1974.

- [19] T. Ishimatsu et al, "Fast 3-dimensional profile measurement using slit ray projection method," '87 KACC, pp. 786-790, 1987.

---

 著 者 紹 介
 

---

## 金 善 一 (正會員)



1960年 3月 19日生. 1983年 2月 아주대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1985年 2月 아주대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사). 1985年 3月~1990年 2月 한국기계연구소 자동제어실 연구원. 1990年 3月~1990年 8月 한국기계연구소 자동제어실 선임연구원. 1990年 8月~현재 거제 전문대학교 전자과 전임강사. 1990年 8月~현재 아주대학교 박사과정 재학중. 주관심분야는 신호처리, 패턴인식, Robot Vision 등임.

## 梁 潤 模 (正會員)



1952年 8月 25日生. 1979年 2月 고려대학교 전자공학과 졸업. 1984年 3月 일본 동북대학 정보공학과 대학원 졸업(석사). 1988年 3月 동교 정보공학과 박사과정 졸업(박사). 1980年~1990年 한국기계연구소 근무. 현재 고려대학교 정보공학과 조교수. 주관심분야는 문자인식 및 영상인식 등임.

## 鄭 在 紋 (正會員)



1957年 4月 26日生. 1979年 2月 울산공과대학 전기전자공학과 졸업(공학사). 1981年 2月 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 1983年 8月~1989年 2月 한국기계연구소 자동제어실

연구원. 1989年 3月~1991年 1月 한국기계연구소 자동제어실 선임연구원 1987年 미국 플로리다 대학 전자공학과 객원연구원. 현재 일본 구주 공업대학 정보공학부 대학원 재학중. 주관심분야는 시각, 인공지능 입체형상인식 등임.