

# 레이저 슬릿을 사용하는 능동거리 센서의 정확한 3D 데이터 추출 알고리즘

차 영 엽,\* 권 대 갑\*\*

## An Exact 3D Data Extraction Algorithm For Active Range Sensor Using Laser Slit

Y. Y. Cha,\* D. G. Gweon\*\*

### ABSTRACT

The sensor system to measure the distance precisely from the center of the sensor system to the obstacle is needed to recognize the surrounding environments, and the sensor system is to be calibrated thoroughly to get the range information exactly. This study covers the calibration of the active range sensor which consists of camera and laser slit emitting device, and provides the equations to get the 3D range data. This can be possible by obtaining the extrinsic parameters of laser slit emitting device through image processing the slits measured during the constant distance intervals and the intrinsic parameters from the calibration of camera. The 3D range data equation derived from the simple geometric assumptions is proved to be applicable to the general cases using the calibration parameters. Also the exact 3D range data were obtained to the object from the real experiment.

**Key words** : Active Range Sensor (능동거리 센서), Range Data Extration (거리 데이터추출), Laser Range Finder (레이저 거리계), Calibration (캘리브레이션)

#### 기호설명

$d_u, d_v$  : CCD 배열에서 인근 화소사이의 U, V 방향 거리  
 $k_1, k_2$  : 반경방향의 렌즈왜곡 상수

$L_A$  : 지면에서부터 제3 반사경까지 높이  
 $L_B$  : CCD 카메라의 렌즈중심과 제3 반사경 사이의 거리  
 $L_F$  : CCD 카메라의 초점거리  
 $N_{cu}$  : CCD 배열에서 U 방향의 화소 수

\* 원광대학교 기계설계공학과

\*\* 한국과학기술원 기계공학과

- $N_{fu}$  : 컴퓨터 프레임 메모리에 저장되는 U 방향의 화소수  
 $R$  : 회전행렬 (rotation matrix)  
 $S_u$  : 스케일 팩터 (scale factor)  
 $T$  : 병진 벡터 (translation vector)  
 $[U, V, W]$  : CCD 카메라 좌표계  
 $[U_u, V_u]$  : 이상적인 pin-hole 카메라 모델에 대한 좌표계  
 $[U_d, V_d]$  : 실제 카메라의 렌즈왜곡을 고려한 좌표계  
 $[U_f, V_f]$  : 컴퓨터 프레임 메모리에서의 좌표계  
 $[X, Y, Z]$  : 기준 좌표계  
 $[X', Y', Z']$  : 레이저 거리계의 상대 좌표계  
 $[X_w, Y_w, Z_w]$  : 3D world 좌표계  
 $\theta_v$  : CCD 카메라의 경사각도 ; (view angle) ; 지면과 W-축 사이의 각도  
 $\theta_B$  : 레이저 빔의 경사각도 ; (beam angle) ; 지면과 레이저 슬릿 (slit) 사이의 각도  
 $\theta_R$  : X 축과 X' 축 사이의 각도

## 1. 서 론

3차원 측정을 위하여 측정장치 자체에서 빛이나 음파 등을 직접 발사하는 능동 거리센서 중에서 레이저를 사용하는 레이저 거리계는 물체의 3차원 데이터를 직접적으로 얻을 수 있기 때문에, 다방면의 응용분야를 가진다.<sup>(1)</sup> 그 기본원리는 레이저 빔, 슬릿, 또는 스트라이프를 물체에 투영 (projection) 시키고, 일정한 거리만큼 떨어진 곳에 설치된 카메라로서 영상을 얻은 다음, 삼각법을 이용하여 기준 (reference) 좌표계에 대한 물체의 거리정보를 얻는다. 그러나, 이러한 레이저 거리계의 캘리브레이션 (calibration) 방법을 기술한 논문은 소수이다.<sup>(2)</sup> 설사 있더라도, 그들 연구들이 레이저 슬릿면의 법선벡터 (normal vector)가 영상면 (image plane)의 법선벡터에 수직 (orthogonal)이라는 가정을 하였다.<sup>(3)</sup> 따라서 종래의 레이저 거리계들은 기구적으로 이 가정이 만족되도록 조정되었다. 그러나 전방향형의 일반적인 레이저 거리계는 이러한 간단한 가정에는 적합하지 않는 구조를 가지고 있으므로, 물체까지의 정확한 거리 데이터를 얻기 위하여 새로운 캘리브레이션 방법과 3차원 데이터 계산식이 유도되어야 한다.

전방향형 레이저 거리계의 캘리브레이션은 일반적인 카메라 캘리브레이션과 비교해서 더 복잡한 과정을 거

쳐야 한다. 그것은 카메라 뿐만 아니라 레이저 슬릿 주사장치도 함께 캘리브레이션 되어야 하기 때문이다. 일반적인 카메라 캘리브레이션의 경우에, 두 종류의 카메라 모델이 사용된다. 그것은 pin-hole 모델과 two-plane 모델이다. 먼저, pin-hole 모델<sup>(4,5,6)</sup>은 내부 (intrinsic)와 외부 (extrinsic) 카메라 매개변수의 유도를 전제로 한다. 여기서 내부 카메라 매개변수는 카메라의 초점거리 (focal length), 스케일 팩터 (scale factor), 그리고 렌즈왜곡 (lens distortion) 변수들이다. 또한 외부 카메라 매개변수는 카메라 좌표계와 기준 좌표계 사이의 회전각 (rotation angle)과 병진벡터들이다. 그 다음으로, two-plane 모델<sup>(7,8,9)</sup>은, 사용자 (user)의 입장에서 보면, 카메라 캘리브레이션을 수행하는데 가장 간단한 방법이다. 이 방법에서는 어떠한 카메라 매개변수도 유도할 필요가 없다. 즉, 이 방법은 카메라 매개변수에 대한 정보를 먼저 요구하지 않는 장점이 있다. 두 개의 평행한 캘리브레이션용 볼록 위의 점들과 영상면에 투영된 점들 사이의 대응문제를 해결해 주지만 하면된다.

본 연구에서는 이미 개발된 전 방향형 레이저 거리계 (omnidirectional laser range finder)<sup>(10,11)</sup>의 캘리브레이션 방법 및 3차원 거리데이터 추출 알고리즘을 다룬다. 여기서는 pin-hole 카메라 모델에 기초한 CCD 카메라의 내부 매개변수를 구하고, 이 매개변수를 이용하여 레이저 슬릿 발생장치의 정확한 설계상수, CCD 카메라의 위치와 자세를 구한다. 몇가지 가정에 의해서 얻을수 있는, 캘리브레이션을 하지 않은 상태의, 간단한 3차원 거리 데이터 계산식이 카메라와 레이저 거리계의 캘리브레이션에서 얻어진 매개변수에 의해서 정확한 3차원 거리데이터 계산식으로 확장될 수 있음을 보인다. 또한 실제실험에 의해서 정확한 3차원 거리데이터가 구해진다 (1.5m 이내에서는 0.6% error, 2.1m 에서는 0.8% error).

## 2. 레이저 거리계

### 2.1 레이저 거리계의 구조

Fig. 1은 전방향형 레이저 거리계 (laser range finder)의 외관을 보여주고 있다. Fig. 2는 이 레이저 거리계의 구조를 보여준다. 전체 구조는 상부 실린더와 하부 실린더로 구성되는데, 상부 실린더에는 CCD 카메라, 제3 반사경 회전기구 그리고 실린더 형상의 렌즈

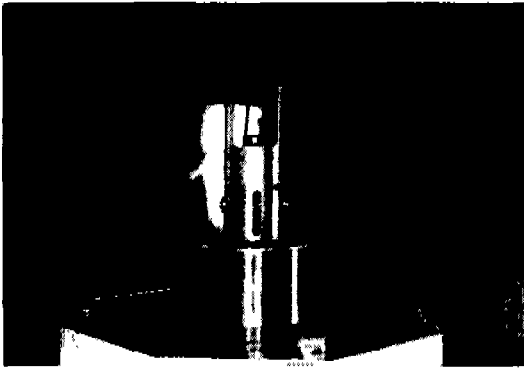


Fig. 1 Photograph of laser range finder

세트가 장착되고, 하부 실린더에는 상부 실린더 회전 기구가 장착되어 있다. 제1, 제2 반사경은 He-Ne 레이저 광원으로부터 나오는 빔을 직각으로 구부린다. 그 레이저 빔은 실린더 형상의 렌즈 세트에 의해서 슬릿 빔으로 바뀌고<sup>(13)</sup>, 이 슬릿 빔은 제3 반사경 회전용 모터와 베벨기어에 의하여 회전하는 제3 반사경에 의하여 방향이 꺾인다.<sup>(10,11)</sup>

다른 한편으로, 물체(object ; obstacle) 면에서 반사된 레이저 빔은 광학 노이즈를 제거하기 위하여 CCD 카메라 앞에 부착된 광학 밴드-패스 필터(optical band-pass filter)를 통과하여 CCD 소자에 의해서 검출된다. 결국 발사되는 슬릿 레이저 빔은 상부 실린더 회전용 모터와 제3 반사경 회전용 모터에 의해서 좌우로 회전되고 상하로도 움직여질 수 있다. 이들 각 모터의 원점 위치를 지정해 주기 위하여 원점 판(zero-

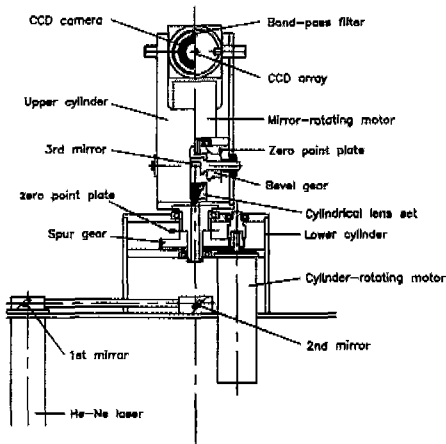


Fig. 2 Structure of laser range finder

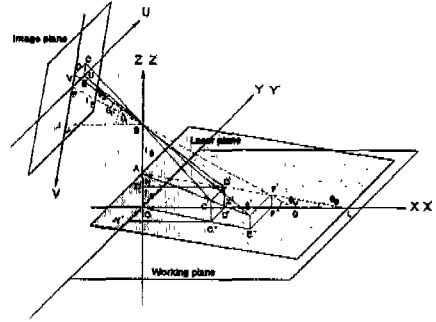


Fig. 3 Coordinate systems of laser range finder

point plate)이 제3 반사경 회전용 모터와 상부 실린더 회전용 모터 각각에 연결된 베벨기어와 스퍼어기어에 고정되어 있다.

### 2.2 간단한 3차원 위치 계산

Fig. 3은 물체에 의해서 반사된 레이저 슬릿으로부터 3차원 위치를 계산하기 위한 좌표계를 보여주고 있다.<sup>(10,11)</sup> 이 시스템에는 3개의 좌표계가 있는데, 기준 좌표계  $[X, Y, Z]$ , 상대 좌표계  $[X', Y', Z']$ , 그리고 카메라 좌표계  $[U, V, W]$  가 그것이다. 기준 좌표계  $[X, Y, Z]$ 는 작업면의 바닥에 고정되어 있다. 이 좌표계의 Z 축은 작업면(working plane)의 수직 방향과 일치한다. 상대 좌표계  $[X', Y', Z']$ 의 원점은 기준 좌표계의 원점과 일치하고, Z'축은 기준 좌표계의 Z축과 일치한다. 그리고 X'Y'면은 기준 좌표계의 XY면에 상대적으로 회전하고, 그 상대적인 회전각은  $\theta_R$  (그림에는 표시되어있지 않음; X축과 X'축 사이의 각도)이다. 그리고 점 A는 제3 반사경의 중심점이다. 실린더 형상의 렌즈세트에서 만들어진 슬릿 레이저 빔은 점 A로부터 나오고, 레이저 슬릿의 레이저 면(laser plane)은 X'Y'면과 함께 회전한다. 제3 반사경의 높이(점 O에서 점 A까지 거리)는  $l_A$ 이다. 빔 각도  $\theta_B$ 는 작업면과 레이저면 사이의 각도이다. 카메라 좌표계  $[U, V, W]$ 의 W축은 CCD 카메라가 향하는 방향(view direction)과 일치한다. CCD 카메라의 렌즈중심은 점 B에 위치하고, CCD 소자는 렌즈의 초점면(UV면), 즉 영상면(image plane)에 위치한다.

카메라의 경사각도  $\theta_V$ 는 W축과 작업면 사이의 각도이다. 카메라 렌즈의 중심과 제3 반사경의 중심은 모두 Z축 위에 위치한다고 가정하고, 렌즈 중심위치 B는 제3 반사경의 중심으로부터  $l_B$  만큼 떨어져 있다. 그리고

$l_f$ 는 렌즈의 초점거리이다. 영상면 (image plane)에서는 물체에서 반사된 슬릿 레이저 빔이 여기에 모아진다. 영상에서 U축의 값은 반사된 슬릿 레이저 빔의 Y'축의 값을 나타내고, V축 값은 기준 좌표계 중심으로부터 빔까지의 거리 정보를 준다. 수식의 유도를 위하여 그림에서와 같이  $\theta_R = 0$ 이라 가정하면, 영상면 (U, V) 위의 점 C로부터 상대 좌표계  $(X', Y', Z')$  위의 점 C'로 변환하는 식이 다음과 같이 얻어진다.

$$X' = \frac{l_B}{\tan \theta_V - \frac{l_f}{V} - \tan \theta_B} \quad (1)$$

$$Y' = -X' \frac{U}{l_f \cos \theta_V} \quad (2)$$

$$Z' = l_A (1 - X' \frac{\tan \theta_B}{l_A}) \quad (3)$$

앞에서  $\theta_R = 0$ 으로 가정했으므로, 상대 좌표계  $(X', Y', Z')$ 에서 3차원 위치 데이터는 기준 좌표계  $(X, Y, Z)$ 에서의 위치 데이터와 일치한다. 즉,  $X=X'$ ,  $Y=Y'$  그리고  $Z=Z'$ 이다. 만약  $\theta_R \neq 0$ 인 경우에, 상대 좌표계  $(X', Y', Z')$ 의 3차원 위치 데이터는 기준 좌표계  $(X, Y, Z)$ 의 위치 데이터로 변환되어야 한다. 이는 다음과 같은 간단한 변환 행렬로부터 얻어진다.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_R & -\sin \theta_R & 0 \\ \sin \theta_R & \cos \theta_R & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} \quad (4)$$

앞에서 거론한 간단한 3차원 위치 계산식의 유도과정에서는 다음과 같은 몇가지의 가정이 사용된다.

- (1) 렌즈왜곡은 무시한다.
- (2) 영상의 수평축에 대한 scale factor를 무시한다.
- (3) CCD 카메라의 렌즈중심이 Z' 축상에 존재한다.
- (4) 레이저 거리계의 설계상수  $l_A$ 와  $l_B$ 가 이미 알려져 있다.

그러나 이러한 가정들은 개발된 전방향형 레이저 거리계의 간단한 3D 데이터를 얻는데는 유리하지만, 다른 한편으로 실제시스템과 거리가 있기때문에 여기서 얻어지는 3D 거리 데이터는 오차를 많이 가지고 있을 수 밖에 없다.

### 3. 레이저 거리계의 캘리브레이션

물체까지의 정확한 3차원 거리데이터를 얻기위하여, 레이저 거리계는 캘리브레이션 되어야 한다. 레이저 거리계의 캘리브레이션은 카메라 뿐만 아니라 레이저 슬릿 주사장치도 캘리브레이션 되어야 하기 때문에, 일반적인 카메라 캘리브레이션 보다 더 복잡하다. 제안된 레이저 거리계의 캘리브레이션은 다음과 같은 순서로 이루어진다. 먼저 pin-hole 카메라 모델에 기초한 CCD 카메라의 내부 매개변수를 구하고, 이 매개변수를 이용하여 레이저 슬릿 발생장치의 정확한 설계상수, CCD 카메라의 위치와 자세를 구한다. 결국, 이러한 설계상수와 CCD 카메라의 외부 매개변수를 이용하여 물체까지의 정확한 3차원 거리 데이터를 구할 수 있다. 앞에서 거론한 가정 중에서 첫번째와 두번째 사항은 CCD 카메라의 캘리브레이션에서 일반화 시키고, 세번째와 네번째 사항은 레이저 거리계의 캘리브레이션에서 일반화 시킨다. 마지막으로 이들 캘리브레이션 결과를 이용한 정확한 3차원 거리데이터의 계산방법을 보여준다.

#### 3.1 CCD 카메라의 캘리브레이션

##### A. 카메라 모델

정확한 카메라 캘리브레이션은 그 분야의 전문가와 값비싼 장비가 요구되는 어려운 일이다. 그 어려움은 렌즈왜곡의 비선형성에 기인한다. 일반적으로 기하학적 카메라 캘리브레이션 문제는 정사영 (projection) 문제와 역사영 (back-projection) 문제로 대별된다. 전자는 컴퓨터 그래픽에 대한 것이고, 후자는 컴퓨터 비전에 대한 것이다. 컴퓨터 비전과 그래픽에서는 3D 공간에서의 점들을 2D 영상의 대응되는 점으로 맵핑 (mapping) 하는 문제를 다룬다. 컴퓨터 그래픽에서는 물체 표면위의 한점이 영상면 위의 어느점에 맵핑되어야 하는지를 결정한다. 컴퓨터 비전에서는 2D 영상에서의 한점이 실제 물체의 3D 데이터를 얻는데 사용된다. 이들 모두의 경우에, 3D world 좌표계와 2D 영상 좌표계 사이의 맵핑을 알고 있어야 한다.

Fig. 4는 정사영과 렌즈왜곡에 따른 카메라의 기하학에 관한 것이다. 여기서는 6개의 좌표계가 사용된다;  $[X_w, Y_w, Z_w]$ 는 3D world 좌표계 이고,  $[X, Y, Z]$ 는 3D 카메라 좌표계,  $[X, Y]$ 는 2D 영상 좌표계,  $[X_u, Y_u]$ 는 렌즈왜곡을 고려하지 않은 이상적인 pin-hole 카메라 모델에 대한 좌표계,  $[X_v, Y_v]$ 는 실제 렌

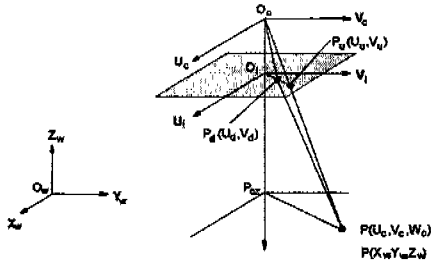


Fig. 4 Coordinate systems for camera calibration

즈왜곡을 고려한 카메라 모델에 대한 좌표계, 그리고  $[X_f, Y_f]$ 는 컴퓨터의 프레임 메모리 (frame memory)에서의 원점이  $(C_x, C_y)$ 인 discrete 영상에 대한 좌표계를 나타낸다.

일반적으로 카메라 매개변수는 3D world 좌표계에서 점 P를 2D 컴퓨터 프레임 메모리에서의 discrete 영상 좌표계로의 변환과정에 관계하는데, 이러한 변환은 다음의 4단계로 이루어진다.<sup>(6)</sup>

(1) 3D world 좌표계에서 3D 카메라 좌표계로의 변환

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \end{bmatrix} + T \quad (5)$$

여기서,  $R = \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 \\ r_4 & r_5 & r_6 \\ r_7 & r_8 & r_9 \end{bmatrix}$ ,  $T = \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix}$

(2) pin-hole 카메라의 기하학적 정사영을 가정한, 3D 카메라 좌표계에서 이상적인 2D undistorted 영상 좌표계로의 변환

$$X_u = f \frac{x}{z} \quad (6)$$

$$Y_u = f \frac{y}{z} \quad (7)$$

(3) 반경방향 렌즈 왜곡을 고려한 2D undistorted 영상 좌표계에서 distorted 영상 좌표계로의 변환

$$X_d + X_d(k_1 r^2 + k_2 r^4) = X_u \quad (8)$$

$$Y_d + Y_d(k_1 r^2 + k_2 r^4) = Y_u \quad (9)$$

여기서,

$$r^2 = X_d^2 + Y_d^2 \quad (10)$$

이고,  $k_1$ 와  $k_2$ 는 반경방향의 렌즈왜곡 상수 이다.

(4) 2D distorted 영상 좌표계에서 컴퓨터 프레임 메모리 좌표계로의 변환

$$X_f = S_x \frac{X_d}{d'_x} + C_x \quad (11)$$

$$Y_f = \frac{X_d}{d_y} + C_y \quad (12)$$

여기서,

$$d'_x = d_x \frac{N_{cx}}{N_{fx}}$$

이고,  $d_x$ 와  $d_y$ 는 카메라의 CCD 배열에서 근접한 화소사이의 X와 Y방향 거리,  $N_{cx}$ 는 그 화소의 X방향 갯수,  $N_{fx}$ 는 컴퓨터의 프레임 메모리에 저장되는 X방향의 discrete 화소의 갯수이다.

따라서 추정할 매개변수는 카메라의 자세와 위치 (rotation matrix R, translation vector T), 유효 초점거리 (effective focal length f), 렌즈의 반경방향 왜곡계수 (distortion factor  $k_1, k_2$ ), 그리고 영상의 수평축 스케일 팩터 (scale factor  $S_x$ )이다. 특히 렌즈의 반경방향 왜곡계수는 2차항 만을 고려해도 충분하므로,  $k_2$ 는 무시할수 있고, 따라서  $k = k_1$ 으로 놓는다. 결국 다음과 같은 2단계의 선형연산과 비선형연산에 의하여 이러한 카메라 매개변수를 찾을 수 있다.

B. 선형연산에 의한 매개변수 추정

먼저 바닥에 있는 캘리브레이션용 볼록의 영상을 처리하여 각 원의 edge 를 구한 다음 각 원의 중심점의 위치

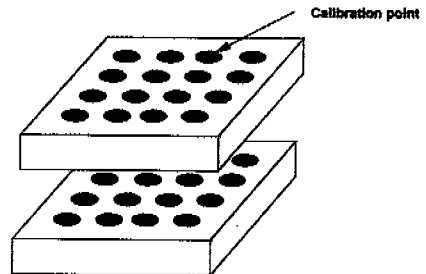


Fig. 5 Calibration points for camera calibration

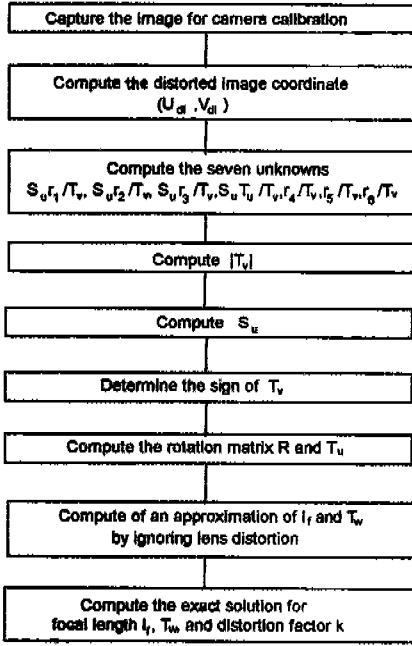


Fig. 6 Flow chart for camera calibration

를 구한다. 또  $Z_w$  축으로 일정한 높이만큼 올린 캘리브레이션용 블록의 영상을 처리하고 위 과정을 반복한다. 그 위치 데이터가  $X_f$  와  $Y_f$  가 된다. 선형연산을 위해서는 7개 이상의 데이터 점이 필요하고, 비선형 연산을 위해서는 2개 이상의 점이 필요하다. 실제로 pseudo inverse 가 안정적인 해를 구하기 위해서는 이보다 훨씬 많은 데이터 점이 필요하므로, 30개 이상의 데이터 점을 가진 2개의 면을 사용할 수 있다. Fig. 5는 카메라 캘리브레이션에서 사용되는 여러개의 데이터 점(point)을 가진 캘리브레이션 용 블록의 예를 보여주고 있다. Fig. 6은 카메라의 캘리브레이션 순서도를 보여주고 있다.

“렌즈의 왜곡에 의한 상의 변화는 반경방향으로만 존재한다.”는 관측 결과<sup>[12]</sup>를 기초로 하여, 식(5) 부터 (12)를 이용하여, 다음의 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{Y_d}{X_d} = \frac{y}{x} = \frac{r_4 x_w + r_5 y_w + r_6 z_w + T_y}{r_1 x_w + r_2 y_w + r_3 z_w + T_x} \quad (13)$$

식(11) 과 (12) 로 부터

$$\begin{aligned} X_d &= \frac{d'_x}{S_x} (X_f - C_x) \\ Y_d &= \frac{d'_y}{S_y} (Y_f - C_y) \end{aligned} \quad (14)$$

위 식(13) 과 (14)를 정리하면

$$\begin{bmatrix} Y_d x_w & Y_d y_w & Y_d z_w & Y_d & -X_d x_w & -X_d y_w & -X_d z_w \end{bmatrix} \cdot L = X_d \quad (15)$$

여기서,

$$L = \begin{bmatrix} \frac{S_x r_1}{T_y} & \frac{S_x r_2}{T_y} & \frac{S_x r_3}{T_y} & \frac{S_x T_x}{T_y} & r_4 & r_5 & r_6 \\ T_y & T_y & T_y & T_y & T_y & T_y & T_y \end{bmatrix}^T$$

위의 식(15)를 보면 캘리브레이션 점  $(x_w, y_w, z_w)$ 을  $n \gg 7$  이상 사용할 경우  $n \times 7$  행렬이 된다. 따라서 pseudo inverse 를 취하여 미지의 벡터 L을 구할 수 있게 된다. 회전 행렬의 각 행은 제곱의 합이 1이 되므로 다음의 결과를 얻어낼 수 있게 된다.

$$|T_y| = \sqrt{L_5^2 + L_6^2 + L_7^2} \quad (16)$$

$$S_x = \sqrt{L_1^2 + L_2^2 + L_3^2} \cdot |T_y| \quad (17)$$

$T_v$ 의 부호를 구하기 위하여 우선  $|T_v|$ 를 양수로 가정하고 식(15)에 의해 모든 미지수를 구한다. 임의의 점  $(x_w, y_w, z_w)$ 를 무작위로 선택하고 식(13)에 대입하여  $(x, y)$ 를 구한다. 초점거리 f와 z 좌표는 양수이므로 영상 좌표로부터 계산된  $(X_d, Y_d)$ 와  $(x, y)$ 는 그 부호가 같아야 한다. 만일 다르다면 실제  $T_v$ 는 음수가 된다. 따라서 식(15)로부터 다시 미지수를 구해야 한다. 그리고  $r_7, r_8, r_9$ 는 회전 행렬의 직교성을 이용하여 구할 수 있다. 앞에서 구한 회전행렬 R의 두 행의 외적이 바로  $r_7, r_8, r_9$ 이 되는 것이다.

### C. 비선형 연산에 의한 매개변수 추정

- (1) 렌즈왜곡을 무시한 유효 초점거리 f와  $T_z$ 의 추정  
렌즈의 왜곡을 무시하면 식(7)로부터

$$Y_u = f \frac{y}{z} \quad (18)$$

여기서,

$$z = r_7 x_w + r_8 y_w + r_9 z_w + T_z = w + T_z$$

이 식을 정리하면

$$[y - Y_u] \cdot \begin{bmatrix} f \\ T_z \end{bmatrix} = w \cdot Y_u \quad (19)$$

2개 이상의 점을 sampling 한후 psuedo inverse

를 구해  $f$ 와  $T_z$ 를 구할 수 있다.

(2) 렌즈왜곡을 고려한  $f$ ,  $T_z$ ,  $k$ 의 추정

식(6)과 (7)에서 렌즈의 왜곡계수  $k$ 를 고려할 경우, 다음의 식과 같이 표현된다.

$$X_d(1 + kr^2) = f \frac{x}{z} \quad (20)$$

$$Y_d(1 + kr^2) = f \frac{y}{z}$$

시편상의 각각의 점에 대해서 오차를 다음과 같이 정의한다.

$$E = \sum_i^N (f_{xi}^2 + f_{yi}^2) \quad (21)$$

$i = 1, 2, \dots, N$  (number of sampled data points)

$$f_{xi} = X_{ui}(1 + kr^2) - f \frac{x}{z} \quad (22)$$

$$f_{yi} = Y_{ui}(1 + kr^2) - f \frac{y}{z}$$

렌즈의 왜곡을 무시한 파라미터 값으로부터 시작하여 Steepest descent method를 사용하여 다음과 같이 수정하여 간다.

$$\Delta k = \eta \left( -\frac{\partial E}{\partial k} \right)$$

$$\Delta f = \eta \left( -\frac{\partial E}{\partial f} \right) \quad (23)$$

$$\Delta T_z = \eta \left( -\frac{\partial E}{\partial T_z} \right)$$

결과적으로 이와같은 카메라 캘리브레이션을 통하여 CCD 카메라의 내부와 외부 매개변수들을 모두 구할 수 있다.

### 3.2 레이저 거리계의 캘리브레이션

앞절에서 거론한 CCD 카메라의 캘리브레이션은 레이저 거리계와 분리된 상태에서 독립적으로 이루어진다. 그것은 레이저 거리계에 장착된 상태에서, CCD 카메라의 캘리브레이션을 위하여 사용되는 대형의 캘리브레이션용 블럭 제작문제 뿐만 아니라, 캘리브레이션의 복잡성에도 기인한다. 카메라 캘리브레이션을 통하여 CCD 카메라의 내부와 외부 매개변수들을 구할 수 있지만, 그들 중에서 CCD 카메라의 내부 매개변수만이 제안된 레이저 거리계의 캘리브레이션에서 사용된다. 따라서 CCD 카메라의 외부 매개변수와 레이저 슬릿 발생장치

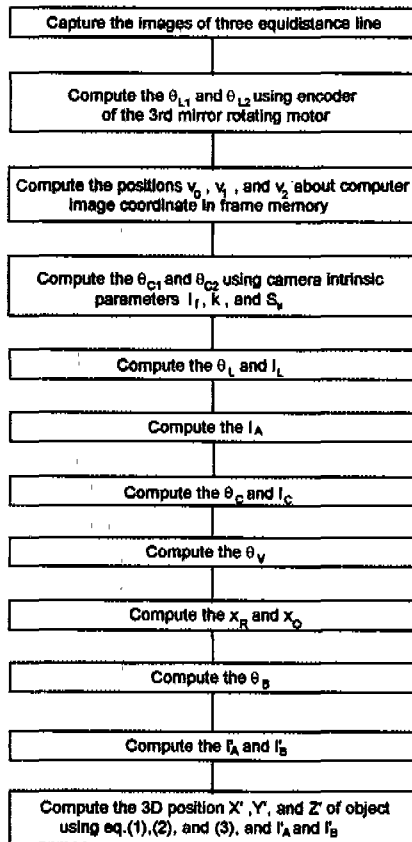


Fig. 7 Flow chart for laser range finder calibration and 3D data calculation

의 설계상수는 레이저 거리계의 캘리브레이션에서 동시에 얻어진다. 레이저 거리계의 캘리브레이션을 위하여 작업면은 평평하고, CCD 카메라의 roll 각도가 zero이며,  $\theta_R = 0$ 일때 레이저 슬릿은  $X'$ 축에 대하여 수직하다고 가정한다. Fig. 7은 카메라 캘리브레이션에서 얻어진 내부 매개변수를 이용한 레이저 거리계의 캘리브레이션과 3D 거리데이터 계산 순서를 보여주고 있다.

Fig. 8은 레이저 거리계의 캘리브레이션과 3차원 위치 데이터를 계산하기 위한 좌표계를 보여주고 있다. 간단한 3D 거리 데이터의 유도를 위한 Fig. 3과 비교해서, CCD 카메라의 렌즈중심이  $Z'$ 축 위의 점 B에서 임의의 점 B'로 옮겨졌음을 알 수 있다. 여기서 CCD 카메라의 광축(optical axis)은 점  $O'_C$ , B', B,  $O_C$  그리고 H를 지난다. 영상면은 임의의 축점위치 B'로부터 축점 거리  $L_f(B'O'_C)$ 만큼 떨어진 곳에서  $O'_C$ 를 원점으로하여

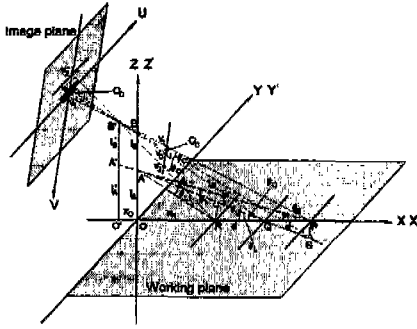


Fig. 8 Coordinate systems for calibration of laser range finder

역상으로 나타나지만, 실제로 모니터에서 얻어지는 영상은 쫓점위치 B'로 부터 쫓점거리  $l_f(\overline{B'O_c} = \overline{B'O'_c})$ 만큼 떨어진 곳에서  $O_c$ 를 원점으로 하여 바르게 나타난다. 먼저 작업면 위에서 일정거리  $d$ 만큼 떨어져 있는 3개의 레이저 슬릿을 순차적으로 만들수 있다. 그림에서 보면, 그 레이저 슬릿들은 X'축에 수직하고 점 P, Q, 그리고 R을 지난다. 이들 영상을 컴퓨터의 프레임 메모리에 저장하고, 영상처리를 통하여  $v_0, v_1$  그리고  $v_2$  값을 얻을수 있다. 레이저 슬릿이 발사되는 제3 반사경의 위치인 점 A는 Fig. 3과 동일하지만, X'축 위의 점 P, Q, 그리고 R에 슬릿이 놓이기 위하여 회전각  $\theta_{L1}(\angle RAQ)$ 과  $\theta_{L2}(\angle QAP)$ 는 제3 반사경 회전용 모터의 엔코더(encoder)에 의해서 알 수 있다. 이와같은 3개의 레이저 슬릿은 CCD 카메라의 영상면에서 V 축에 수직하고 점  $v'_1, v'_0$  그리고  $v'_2$ 를 지나는 선으로 나타난다. 따라서 영상면 위의 점  $v'_1, v'_0$  그리고  $v'_2$ 는 각각 점  $v_1, v_0$  그리고  $v_2$ 로 변환된다. 또한 CCD 카메라의 캘리브레이션에서 얻은 유효 쫓점거리  $l_f$ 에 의해서 쫓점 B'를 기준으로 이들 점들과 이루는 각도  $\theta_{C1}(\angle v_0 B' v_2)$ 과  $\theta_{C2}(\angle v_0 B' v_1)$ 가 계산된다. 따라서 작업영역 위에서 일정간격으로 나타낸 레이저 슬릿에서 다음과 같은 식들을 유도할 수 있다.

$$\tan \theta_{C1} = \frac{v_2 - v_0}{l_f + \frac{v_2 v_0}{l_f}} \quad (24)$$

$$\tan \theta_{C2} = \frac{v_1 - v_0}{l_f + \frac{v_1 v_0}{l_f}} \quad (25)$$

또한,  $\triangle APQ$ 와  $\triangle PQS$ 에서  $\theta_L(\angle AQO)$ 와

$$l_L (= \overline{AQ}) \text{에 대한 다음과 같은 관계식}$$

$$(l_L + d \cos \theta_L) \tan \theta_{L2} = d \sin \theta_L \quad (26)$$

이 구해지고, 같은 방법으로,  $\triangle TQR$ 과  $\triangle ART$ 에서

$$(l_L - d \cos \theta_L) \tan \theta_{L1} = d \sin \theta_L \quad (27)$$

을 구할 수 있다. 식(26)과 (27)로부터,  $\theta_L$ 과  $l_L$ 에 대한 관계식을 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\tan \theta_L = \frac{2}{\frac{1}{\tan \theta_{L2}} - \frac{1}{\tan \theta_{L1}}} \quad (28)$$

$$l_L = \frac{d}{2} \left( \frac{1}{\tan \theta_{L2}} + \frac{1}{\tan \theta_{L1}} \right) \sin \theta_L \quad (29)$$

따라서  $l_A (= \overline{OA})$ 는 다음과 같이 구해진다.

$$l_A = l_L \sin \theta_L \quad (30)$$

또한 같은 방법으로,  $\theta_C(\angle B'QO)$ 와  $l_C (= \overline{B'Q})$ 에 대한 관계식을 다음과 같이 얻을수 있다.

$$\tan \theta_C = \frac{2}{\frac{1}{\tan \theta_{C2}} - \frac{1}{\tan \theta_{C1}}} \quad (31)$$

$$l_C = \frac{d}{2} \left( \frac{1}{\tan \theta_{C2}} + \frac{1}{\tan \theta_{C1}} \right) \sin \theta_C \quad (32)$$

따라서, 작업면과 카메라 영상면의 법선벡터 사이의 각(view angle)  $\theta_V$ 는 다음과 같이 구해진다.

$$\theta_V = \tan^{-1} \left( \frac{O'_c v'_0}{l_f} \right) + \theta_C \quad (33)$$

### 3.3 정확한 3차원 위치계산

앞에서와 같이 카메라의 내부 매개변수와 레이저 슬릿 주사장치의 정확한 설계변수가 얻어지면, 2.2 절에서 거론한 간단한 3차원 위치 계산식 (1), (2) 그리고 (3)은 수정되어야 한다. 먼저,  $x_R = \overline{OR}$ 과  $x_O = \overline{OO'}$ 라 놓으면,

$$x_R = \frac{l_A}{\tan \theta_L} - d \quad (34)$$

$$x_O = l_C \cos \theta_C - x_R - d \quad (35)$$

이다. 제3 반사경의 회전에 의하여, 레이저 슬릿이 바



다면에서 점 P에 있다고 가정하면, 레이저 슬릿의 경사 각도  $\theta_B (\angle APO)$ 는 다음과 같이 구해진다.

$$\theta_B = \tan^{-1}\left(\frac{l_A}{x_R + 2d}\right) \quad (36)$$

Fig. 8을 참고하면, 식 (1), (2) 그리고 (3)에서  $l_A$ 와  $l_B$  대신에 다음과 같은  $l'_A (= \overline{O'A'})$ 와  $l'_B (= \overline{A'B'})$ 를 사용한다.

$$l'_A = (x_O + x_R + 2d) \tan \theta_B \quad (37)$$

$$l'_B = l_C \sin \theta_C - l'_A \quad (38)$$

따라서 수정된 3D 위치 계산식은 다음과 같이 얻어진다.

$$\begin{vmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} X' - x_O \\ Y' \\ Z' \end{vmatrix} \quad (39)$$

## 4. 실험

### 4.1 실험 장치

제안된 레이저 거리계에서는 He-Ne 레이저 (10mW power, 632.8nm wavelength)가 광원으로 사용되고, 4개의 실린더 형상을 가진 렌즈가 슬릿 빔을 형성하기 위하여 사용된다. 영상 센서로는 흑/백 CCD 카메라가 사용되는데, 유효 CCD 배열의 크기는 6.4mm (H) × 4.8mm (V), 유효 화소수는 570 (H) × 485 (V)이고 초점거리  $l_f = 12\text{mm}$ 이다. 또한 광학 밴드-패스 필터 (632.8nm wavelength)가 광학 노이즈를 제거하는데 사용된다. 영상처리 유닛 (unit)은 512 (H) × 480 (V) × 7bit 그레이-레벨 (gray-level)의 입력 해상도를 가지는 프레임 그래버 (frame grabber)와 486 CPU 카드 (card)로 구성되어 있다. 주사 기구 (scanning mechanism)는 2개의 DC 서보모터, 1개의 인터페이스 보드 (interface board), 2개의 업-다운 보드 (up-down board) 그리고 모터구동을 위한 286 CPU 카드로 구성된다.

레이저 거리계의 시야 (view field size)와 분해능 (resolution)은 레이저 빔과 카메라의 기울어진 각도, CCD 카메라의 설계상수 (CCD 소자의 화소수, 크기 그리고 초점거리), 그리고 카메라에서 물체까지의 거리에 관계된다. Fig. 3을 참고하면, 시야는 CCD 크기 × 거

리 비 (distance ratio)  $X'/l_f$ 에 의해서 결정된다. 따라서 제안된 레이저 거리계의 시야는  $X'=2\text{m}$ 에서 1.066m이고,  $X'=3\text{m}$ 에서 1.6m이다. 만약  $\theta_R = 0^\circ$ 이고  $\theta_B = 0^\circ$ 이면, 레이저 거리계의 분해능은 CCD 크기/화소 수 × 거리 비  $X'/l_f$ 에 의하여 얻어진다. 따라서 개발된 전방향형 레이저 거리계의 분해능은  $X'=3\text{m}$ 에서 3.1mm (H) × 2.5mm (V)이다. 그러나 실제로 빔 각도  $\theta_B$ 가 zero가 아니므로, 영상에서 수직방향의 종합적인 분해능은 위에서 계산된 것보다 더 나빠진다.

### 4.2 실험 결과

선형연산을 위해서는 7개 이상, 비선형 연산을 위해서는 2개 이상의 캘리브레이션 점이 필요하다. 실제로는 Pseudo inverse가 안정적인 해를 구하기 위해서 이보다 훨씬 많은 데이터 점이 필요하게 된다. 이를 위하여 캘리브레이션 블록으로는 높이 45mm, 윗면 160 × 100mm인 금속 블록을 사용하였으며 각각 30개의 점을 가진 2개의 면이 이용되고 모두 60개의 데이터 점이 사용되었다. 캘리브레이션 점은 직경이 1cm로서 2진 영상으로 받아 들인 후 이 점의 중심을 데이터로 취함으로서 노이즈의 영향을 최소화 하였다. 우선 선형연산에 의해 매개변수를 구하고 비선형 연산은 Steepest descent 방법에 의해 매개변수를 조금씩 수정하고 이에 따라 에러가 줄어 들게 된다. Table 1은 캘리브레이션 된 카메라의 매개변수값을 보여준다. 유효 초점거리가 렌즈의 사양에 나와있는 것과 서로 다른 것은 실제로

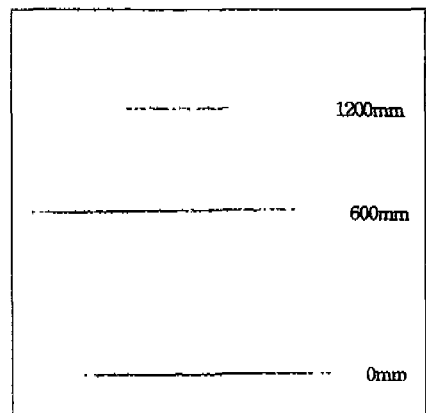


Fig. 9 Laser slit locations obtained from the image processing in the case apart 0, 600, and 1200mm from arbitrary position

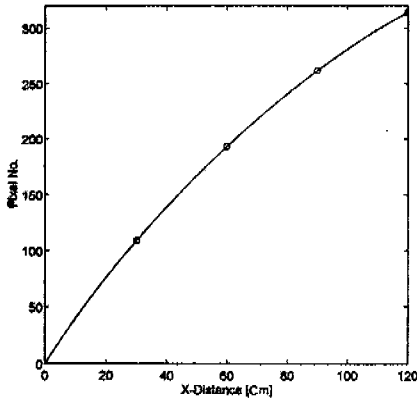


Fig. 10 Relation between distance of laser slit from arbitrary position and fixel distance in computer image frame

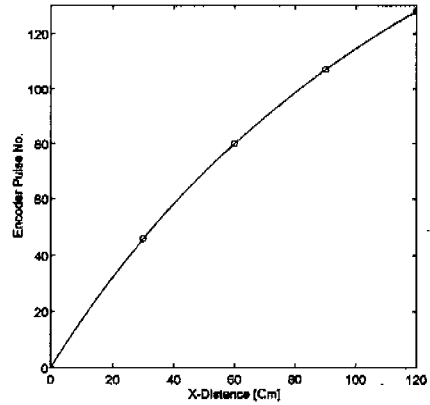


Fig. 11 Relation between distance of laser slit from arbitrary position and rotation angle of the 3rd mirror

렌즈의 두께가 없는 완전한 pin-hole 카메라가 아니기 때문이다.

레이저 거리계의 캘리브레이션을 위하여 작업면에서 레이저 슬릿이 임의의 위치를 기준으로 일정 거리간격 (300mm) 만큼 떨어진 곳(임의의 위치를 기준으로 0, 300, 600, 900, 1200mm)에 각각 놓이도록 제 3반사

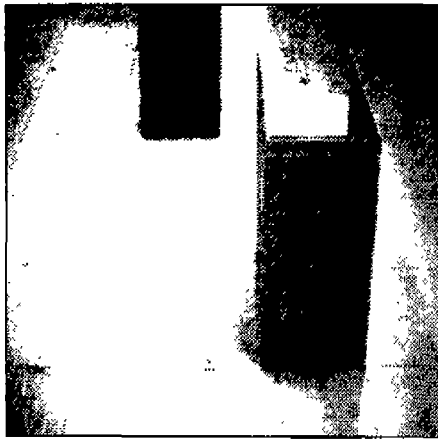
경 회전용 모터를 회전시킨다. 이때 제 3반사경 회전용 모터의 엔코더 값을 읽음으로서 각각의 회전각을 알수 있다. 다른 한편으로, 각각의 위치에서 반사된 레이저 슬릿 영상이 CCD 카메라로부터 컴퓨터의 프레임 메모리에 저장된다. Fig. 9는 임의의 기준위치로 부터 0, 600, 1200mm 만큼 떨어진 곳에 레이저 슬릿이 위치

Table 1. Calibrated parameters of CCD camera

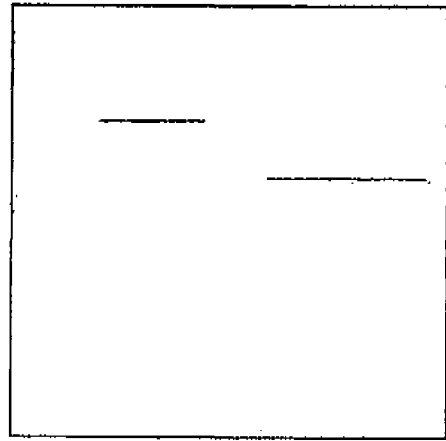
Parameter	Value before calibration	Value after calibration
$l_f$ (mm)	12.000	11.434
k	-	0.003
$S_u$	-	1.095

Table 2. Calibrated parameters of laser range finder

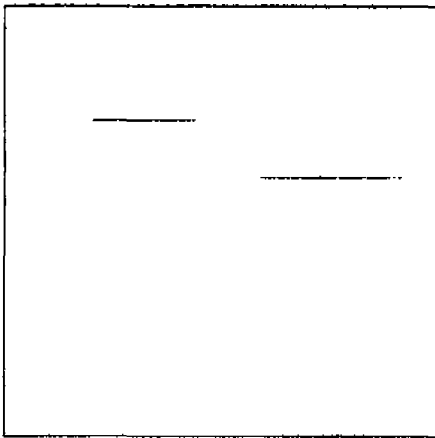
Parameter	Value before calibration	Value after calibration
$\theta_L$ (rad)	-	0.370
$l_L$ (mm)	-	2257.340
$l_A$ (mm)	826.000	817.230
$\theta_C$ (rad)	-	0.490
$l_C$ (mm)	-	2197.820
$x_R$ (mm)	-	1504.210
$x_O$ (mm)	0.000	-164.630
$\theta_V$ (rad)	0.503	0.485



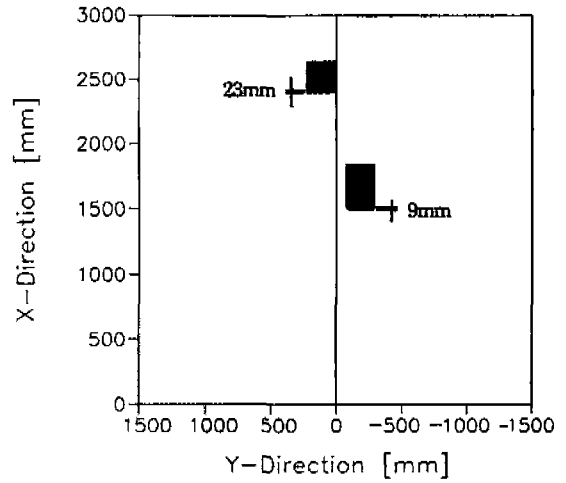
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 12 (a) Object used in experiment, (b) Result of finding the pixels with maximum intensity in each column, (c) Image after removing noises, (d) Range map and measuring error

Table 3. Ranging error

Range (mm)	Error (mm)	% Error
1500	9	0.60
1800	13	0.72
2100	17	0.81
2400	23	0.96

한 경우에 얻어진 3개의 영상을 처리한 결과가 나와 있다. Fig. 10은 레이저 슬릿이 임의의 위치를 기준으로 일정 거리간격 만큼 떨어지게 한후에, 컴퓨터의 프레임 메모리 상에서 계산된 슬릿과 다른 슬릿사이의 화소갯수를 보여준다. Fig. 11은 이때의 제 3반사경 회전각도를 보여주고 있다. 이들을 이용하여 캘리브레이션한 레이저 거리계의 매개변수값이 Table 2에서 보여진다.

Fig. 12(a)는 이 실험에서 사용된 물체를 보여주고 있다.<sup>(10,11)</sup> 물체의 표면에서 반사된 레이저 빔은 CCD 카메라에 의해서 검출되고, 이렇게 얻어진 영상으로부터 거리 데이터를 계산하기 위하여 다음과 같은 처리가 행해진다. 먼저, 영상의 각 열에서 최대 밝기를 가지는 화소를 찾는데, 그 결과가 Fig. 12(b)에서 보여진다. 이 과정에서는, 물체에서 반사된 레이저 빔 뿐만 아니라 노이즈도 동시에 나타나게 된다. Fig. 12(c)는 인근 화소와의 상대적인 거리시험에 의한 노이즈 제거 결과를 보여준다. Fig. 12(d)는 이러한 노이즈 제거 과정에서 살아남은 화소에 대하여,  $I_A$ 와  $I_B$  대신에  $I'_A$ 와  $I'_B$ 를 사용하여 수정 계산한 물체의 거리정보를 보여주고 있다. 이 결과에서 보면 상자의 실제 위치와 비교해서, 제안된 레이저 거리계가 좋은 측정 정밀도를 가지는 것을 알 수 있다. Table 3에서는 실제 실험에 의해서 얻어진 측정거리에 따른 오차를 보여주고 있다. 얻어진 거리 데이터의 측정오차는 1.5m에서 9mm (0.60% 오차), 1.8m에서 13mm (0.72% 오차), 그리고 2.1m에서 17mm (0.81% 오차)였다. 또한 256열(column)을 가진 한개의 영상 프레임(image frame)을 처리하는데 1초 이하의 시간이 걸렸다. 결과적으로 제안된 레이저 거리계는 3D 거리데이터 추출에 사용하는 초음파 센서와 비교해서 물체 모서리 인식과 거리측정에서 우수한 측정 정밀도를 가지고 있고, 비전 센서와 비교해서 데이터 처리시간이 짧은 장점이 있다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 전방향형 레이저 거리계(omnidirectional laser range finder)의 캘리브레이션 방법 및 3차원 거리데이터 추출 알고리즘을 다루었다. CCD 카메라의 랜즈왜곡을 고려하고 pin-hole 카메라 모델에 기초하여 CCD 카메라의 내부 매개변수를 구하고, 이 매개변수를 이용하여 레이저 슬릿 발생장치의 정확한 설계상수, 그리고 CCD 카메라의 위치와 자세를 구했

다. 몇가지 가정에 의해서 얻을 수 있는 캘리브레이션을 하지 않은 상태의 간단한 3차원 거리데이터 계산식이 카메라와 레이저 거리계의 캘리브레이션에서 얻어진 매개변수에 의해서 정확한 3차원 거리데이터 계산식으로 확장될수 있음을 보였다. 결국 이러한 레이저 거리계의 설계상수와 CCD 카메라의 내부와 외부 매개변수를 이용하여 물체까지의 정확한 3차원 거리데이터를 실험에 의해서 구했다.

## 참고문헌

1. P.J.Besl, "Active, optical range imaging sensors", *Machine Vision and Applications*, 1(2), pp.127-152, 1988.
2. G.Champleboux, et.al., "Accurate calibration of cameras and range imaging sensors : the NPBS method", *Proceedings of IEEE Intern. Conf. on Robotics and Automation*, pp.1552-1557, 1992.
3. R.C.Bolles, et.al., "Projector camera range sensing of three-dimensional data", *Machine Intelligence Research Applied to Industrial Automation*, SRI International, pp.29-43, 1983.
4. I.Sobel, "On calibrating computer controlled camera for perceiving 3D scenes", *Artificial Intelligence*, 5, pp.185-198, 1974.
5. R.Y.Tsai, "An efficient and accurate camera calibration technique for 3D machine vision", *IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp.68-75, 1986.
6. Y.Yakimovsky, and R.Cunningham, "A system for extracting three dimensional measurements from a stereo pair of TV cameras", *Computer graphics and Image Processing*, 7, pp.195-210, 1978.
7. H.A.Martins, J.R.Birk, and R.B.Kelley, "Camera models based on data from two calibration planes", *Computer Graphics and Image Processing*, 17, pp.173-180,

- 1981.
8. A.Isaguirre, P.Pu, and J.Summers, "A new development in camera calibration : Calibrating a pair of mobile cameras", Proc. IEEE Conf. on Robotics and Automation, pp.74-79, 1985.
  9. K.D.Gramban, C.E.Thorpe, and T.Kanade, "Geometric camera calibration using system of linear equation", Proceedings IEEE of Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 562-568, 1988.
  10. 차영엽, 권대감, "자율 주행 로봇의 실시간 조종을 위한 레이저 거리계", 한국정밀공학회지, 제 11권, 제3호, pp.131-139, 1994.
  11. Y. Y. Cha, D. G. Gweon and D. G. Lee, "An active range sensor for free ranging mobile robot", Int. Symp. on Robotics and Manufacturing, Maui, USA, August 15-17, 1994.
  12. R. Y. Tsai, "An efficient camera calibration techniques for 3D machine vision", IEEE Proc. Computer Vision and Pattern Recognition, pp.364-374, 1986.
  13. Melles Griot, "Optics Guide 5: Optics, Lasers, Opto\_mechanical components, Tables, Electro-optics", Melles Griot Manual, 1990.