

## 레이저 거리계의 이론적 최소 분해능에 관한 연구

### A Study on the Theoretical Minimum Resolution of the Laser Range Finder

· 차 영 엽 \*, 권 대 갑 \*\*

\* 원광대학교 기계설계공학과 (Tel:0653-50-6693; Fax:0653-50-6666; E-mail:ggypcha@wonms.wonkwang.ac.kr)

\*\* 한국과학기술원 기계공학과 (Tel:042-869-3225; Fax:042-869-5225; E-mail:cheolwoo@mechaopt.kaist.ac.kr)

**Abstract** In this study the theoretical minimum resolution analysis of an active vision system using laser range finder is performed for surrounding recognition and 3D data acquisition in unknown environment. The laser range finder consists of a slitted laser beam generator, a scanning mechanism, CCD camera, and a signal processing unit. A laser beam from laser source is slitted by a set of cylindrical lenses and the slitted laser beam is emitted up and down and rotates by the scanning mechanism. The image of laser beam reflected on the surface of an object is engraved on the CCD array. In the result, the resolution of range data in laser range finder is depend on distance between lens center of CCD camera and light emitter, view and beam angles, and parameters of CCD camera.

**Keywords** Minimum resolution, Active vision system, Laser range finder

## 1. 서론

지금까지 이동로봇에서 사용된 레이저 거리계들은 주로 레이저 스폿, 슬릿 그리고 스트라이프를 이용한다. 최근에 Tanaka[1]는 거리측정을 위한 고속 샘플링 시스템을 제안하였는데, 이는 영상에서 스폿의 위치를 추출하는 카운팅(counting)법을 도입함으로써 가능하였다. Yuta[2]는 평면에 수평한 레이저 슬릿과 카메라를 이용하여 영상을 실시간 처리하였는데, 이 시스템에서 연속적인 영상처리에 걸리는 시간은 256열을 처리하는데 약 3초가 소요되었다.

다른 한편으로 레이저 거리계의 캘리브레이션은 일반적인 카메라 캘리브레이션과 비교해서 더 복잡한 과정을 거쳐야 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[3]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) 계수들이다. 또한 외부 카메라 매개변수는 카메라 좌표계와 기준 좌표계 사이의 회전행렬(rotation matrix)과 병진벡터(translation vector) 들이다.

그 다음으로, two-plane 모델[4]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 블럭위의 점들과 영상면에 투영된 점들 사이의 대응문제를 해결해 주지만 하면된다.

본 연구에서는 레이저 거리계[5]의 CCD 카메라 영상면에서의 한점이 작업면 위의 좌표점으로 맵핑되는 3차원 위치 계산식을 유도하고, CCD 카메라가 작업면에 대해서 기울어지고 레이저 슬릿이 없는 경우의 최소 분해능을 계산하고, 이 결과를 레이저

슬릿이 있는 일반적인 경우의 레이저 거리계 최소 분해능 계산식으로 확장시킨다. 그리고 pin-hole 카메라 모델에 기초하여 CCD 카메라의 내부 매개변수와 이 매개변수를 이용한 레이저 슬릿 발생장치의 정확한 설계상수, CCD 카메라의 위치와 자세가 구해진 레이저 거리계의 정밀한 이론적 최소 분해능을 구하는 방법을 제안한다.

## 2. 3차원 위치계산

Fig. 1은 물체에 의해서 반사된 레이저 슬릿으로부터 3차원 위치를 계산하기 위한 좌표계를 보여주고 있다[5]. 이 시스템에는 3개의 좌표계가 있는데, 기준(reference) 좌표계 [X,Y,Z], 센서 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. 센서 좌표계 [X',Y',Z']의 원점은 기준 좌표계의 원점과 일치하고, Z' 축은 기준 좌표계의 Z 축과 일치한다. 그리고 X'Y'면은 기준 좌표계의 XY면에 상대적으로 회전하고, 그 상대적인 회전각은  $\theta_k$  이다. 그리고 점 A는 제3 반사경의 중심점이다. 그림에 서와 같이  $\theta_k=0$  이라 가정하면, 영상면 [U,V] 위의 점 C로부터 센서 좌표계 [X',Y',Z'] 위의 점 C'로 변환하는 식이 다음과 같이 얻어진다.

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

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

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

### 3. 레이저 거리계의 최소 분해능

레이저 면을 고려하지 않고 작업면에 대한 CCD 카메라의 분해능 계산을 위한 좌표계들이 Fig. 2에서 보여진다.  $l_u$ 를 CCD 화소사이의 수평거리,  $l_v$ 를 CCD 화소사이의 수직거리로 놓으면, 이들은 다음과 같이 구해진다.

$$l_u = \frac{\text{수평방향 CCD 크기}}{\text{수평방향 CCD 화소수}} \quad (4)$$

$$l_v = \frac{\text{수직방향 CCD 크기}}{\text{수직방향 CCD 화소수}} \quad (5)$$

영상면에서 좌표들  $(u, v)_I$ , 영상면의 V축에 투영되는 수직면에서의 좌표들  $(s, t)_V$ , 그리고 작업면 위의 수평면에서의 좌표들  $(x, y)_H$  라 놓을 수 있다. CCD 중점과 초점의 연장선이 작업면과 만나는 점 G에서(그들이 이루는 각도는 view angle;  $\theta_V$ ) 영상면위의 중심에서 수직축으로 V번째 화소에 투영되는 수직면 위의 한점  $(v, 0)_V$ 까지의 거리를  $l(v, 0)_V$ , CCD 카메라의 초점거리  $l_F$ , 그리고 초점 B에서 G까지 거리  $l_{FV}$  라 하면 이들 사이에는 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$l(v, 0)_V = V l_v \frac{l_{FV}}{l_F} \quad (6)$$

또한 CCD 카메라의 수직면이 작업면의 X축과 교차하는 선위에서 영상면의 중심에서 수직축으로 V번째 화소에 투영되는 점을  $(v, v)_V$  라 하면,  $\theta(v, v)_V (= \angle B(v, 0)_V C)$ 는 다음과 같이 계산된다.

$$\theta(v, v)_V = \theta_V - \tan^{-1} \frac{l(v, 0)_V}{l_{FV}} \quad (7)$$

따라서 영상면에서 V축 위의 점  $(0, v)_I$ 에 투영되는 작업면 또는 수직면 위의 점  $(v, v)_V$ 의 X'좌표  $X'(v, v)_V$ 는 다음과 같이 구해진다.

$$X'(v, v)_V = \frac{l_A + l_B}{\tan \theta_V - \frac{V l_v}{l_F}} \frac{V l_v}{1 + \tan \theta_V \frac{V l_v}{l_F}} \quad (8)$$

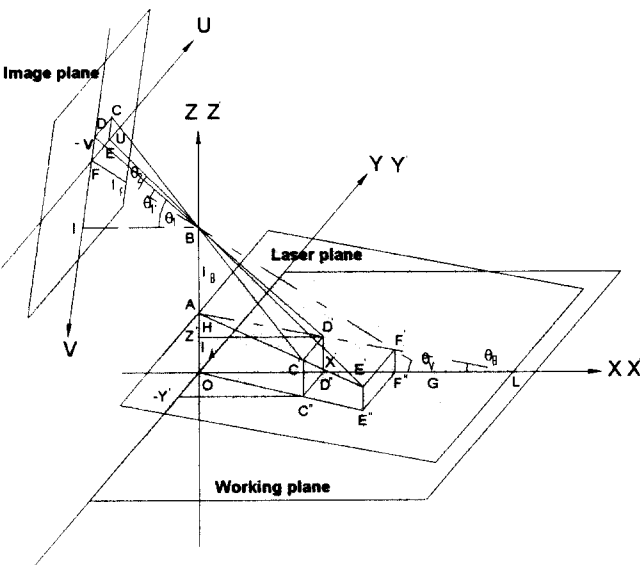


그림 1. 레이저 거리계의 좌표계.

Fig. 1. Coordinate system of laser range finder.

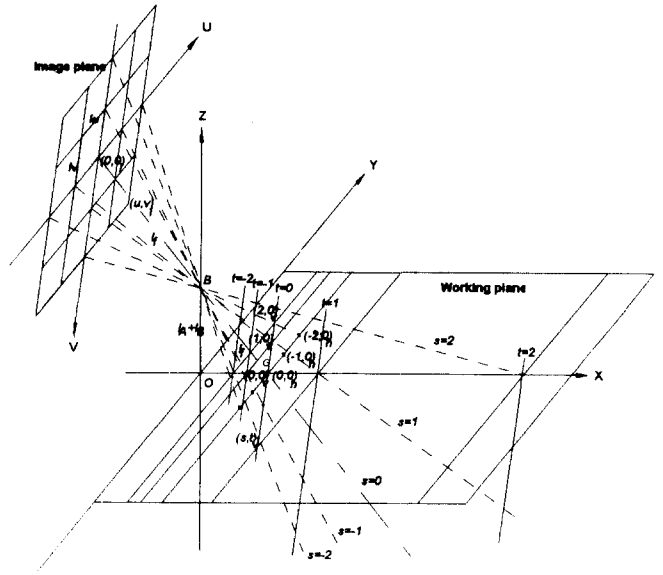


그림 2. CCD 카메라 분해능 계산을 위한 좌표계.

Fig. 2. Coordinate system for calculate the resolution of CCD camera.

다른 한편으로 영상면에서  $(u, v)_I$  화소에 투영되는 작업면 또는 수평면 위의 점  $(u, v)_H$ 의 Y'좌표  $Y'(u, v)_H$ 는 다음과 같이 구해진다.

$$Y'(u, v)_H = -\frac{U l_u}{l_F} \sqrt{(l_A + l_B)^2 + X'(v, v)_V^2} \quad (9)$$

위 식들을 이용하여 레이저 면을 고려하지 않고, CCD 카메라가 작업면에 대해서 일정한 각도  $\theta_V$ 만큼 기울어져 있는 경우의 이론적 최소 분해능을 계산할 수 있다. 먼저 작업면 위에서 X'방향 최소 분해능  $X'_{res}(v, v)_V$ 는 영상면에서 인접한 화소사이의 최대길이 계산에 의해서 다음과 같이 얻어진다.

$$X'_{res}(v, v)_V = X'(v+1, v+1)_V - X'(v, v)_V \quad (10)$$

또한 작업면 위에서 Y'방향 최소 분해능  $Y'_{res}(u, v)_H$ 는 다음과 같이 얻어진다.

$$Y'_{res}(u, v)_H = Y'(u+1, v)_H - Y'(u, v)_H \quad (11)$$

특히 작업면에서 Y'방향 최소 분해능은 영상면의 V좌표에만 관계되고, U좌표 방향으로는 일정하다.

레이저 면을 고려한 작업면에 대한 CCD 카메라의 분해능 계산을 위한 좌표계들이 Fig. 3에서 보여진다. 레이저 슬릿은 점 A에서 만들어지고, 작업면과의 각도는  $\theta_B$ 이다. 레이저 슬릿이 있는 경우의 최소 분해능 계산은 매우 복잡하므로, 작업면 X'축 위의 한 점  $(v+1, v+1)_V$ 에 레이저 슬릿의 끝부분이 위치한다고 가정하고 그 점에서의 최소 분해능을 계산한다. 레이저 슬릿이 없는 경우 작업면 위의 X방향 최소 분해능  $X'_{res}(v, v)_V$ 과 레이저 슬릿이 있는 경우 레이저 면 위에서 X방향 최소 분해능  $X'_{res, laser}(v, v)_V$ 의 관계식은 다음과 같이 얻어진다.

$$\frac{X'_{res}(v, v)_V}{X'_{res, laser}(v, v)_V} = \frac{\tan \theta(v, v)_V - \tan \theta_B}{\tan \theta(v, v)_V} \quad (12)$$

위 식에서 보면 레이저 슬릿의 빔 각도  $\theta_B$ 가 커질수록 X방향 최소분해능은 나빠지고, 만약  $\theta_B = 0^\circ$  이면 레이저 슬릿이 작업면과 일치한 경우이므로 이들 두가지의 최소 분해능은 같게된다.

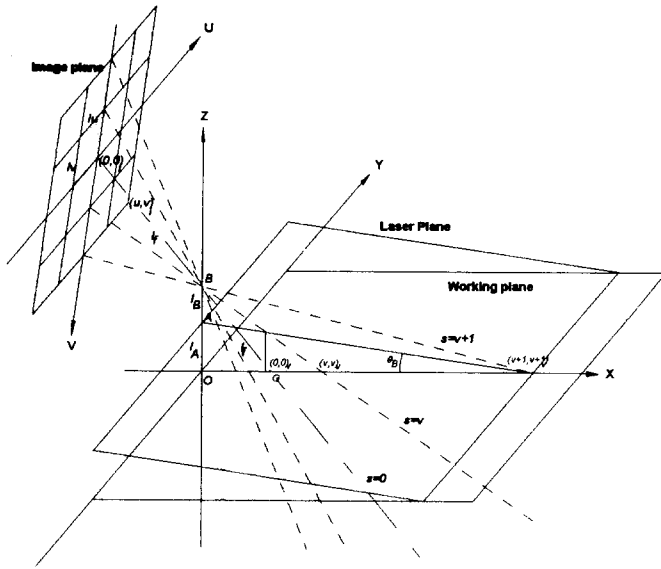


그림 3. 레이저 거리계 분해능 계산을 위한 좌표계.  
Fig. 3. Coordinate system for calculate the resolution of laser range finder.

#### 4. 정확한 최소 분해능 계산

레이저 거리계의 정확한 최소 분해능을 얻기 위하여, 레이저 거리계는 캘리브레이션 되어야 한다. 레이저 거리계의 캘리브레이션은 카메라 뿐만 아니라 레이저 슬릿 주사장치도 캘리브레이션 되어야 하기 때문에, 일반적인 카메라 캘리브레이션 보다 더 복잡하다. 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 순차적으로 구한다. 결국, 이러한 설계상수와 CCD 카메라의 외부 매개변수를 이용하여 물체까지의 정확한 3D 거리 데이터를 구할 수 있다.

Fig. 4는 레이저 거리계의 캘리브레이션과 3차원 위치 데이터를 계산하기 위한 좌표계를 보여주고 있다. 간단한 3D 거리 데이터의 유도를 위한 Fig. 1과 비교해서, CCD 카메라의 초점이 Z'축 위의 점 B에서 임의의 점 B'로 옮겨졌음을 알 수 있다. 먼저 작업면 위에서 일정거리 a만큼 떨어져 있는 3개의 레이저 슬릿을 순차적으로 만들 수 있다. 그림에서 보면, 그 레이저 슬릿들은 X 또는 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 얻을 수 있다. 레이저 슬릿이 발사되는 제3 반사경의 위치인 점 A는 Fig. 1과 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 엔코더에 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 초점거리  $l_f$ 에 의해

서 초점 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.

$$\tan \theta_{C1} = \frac{v_2 - v_0}{l_f + \frac{v_2 v_0}{l_f}} \quad (13)$$

$$\tan \theta_{C2} = \frac{v_1 - v_0}{l_f + \frac{v_1 v_0}{l_f}} \quad (14)$$

또한,  $\theta_L$ 과  $l_L$ 에 대한 관계식을 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\tan \theta_L = \frac{2}{\frac{1}{\tan \theta_{L2}} - \frac{1}{\tan \theta_{L1}}} \quad (15)$$

$$l_L = \frac{d}{2} \left( \frac{1}{\tan \theta_{L2}} + \frac{1}{\tan \theta_{L1}} \right) \sin \theta_L \quad (16)$$

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

$$l_A = l_L \sin \theta_L \quad (17)$$

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

$$\tan \theta_C = \frac{2}{\frac{1}{\tan \theta_{C2}} - \frac{1}{\tan \theta_{C1}}} \quad (18)$$

$$l_C = \frac{d}{2} \left( \frac{1}{\tan \theta_{C2}} + \frac{1}{\tan \theta_{C1}} \right) \sin \theta_C \quad (19)$$

따라서, 작업면(working plane)과 카메라 영상면(image plane)의 법선벡터 사이의 각(view angle)  $\theta_V$ 는 다음과 같이 구해진다.

$$\theta_V = \tan^{-1} \left( \frac{\overline{OC} v_0'}{l_f} \right) + \theta_C \quad (20)$$

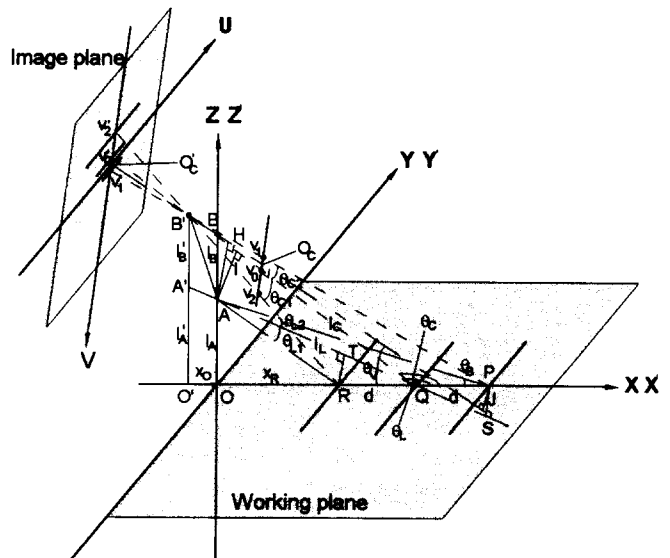


그림 4. 레이저 거리계 캘리브레이션을 위한 좌표계.  
Fig. 4. Coordinate system for laser range finder calibration.

앞에서와 같이 카메라의 내부 매개변수와 레이저 슬릿 주사장치의 정확한 설계변수가 얻어지면, 2장에서 거론한 간단한 3차원 위치 계산식 (1), (2) 그리고 (3)과 3장에서 거론한 최소 분해능 계산식 (6), (7), (8) 그리고 (9)는 수정되어야 한다. 먼저,  $x_R = \overline{OR}$  과  $x_O = \overline{OO'}$  라 놓으면,

$$x_R = \frac{l_A}{\tan \theta_L} - a \quad (21)$$

$$x_O = l_C \cos \theta_C - x_R - a \quad (22)$$

이다. 제3 반사경의 회전에 의하여, 레이저 슬릿이 바닥면에서 점 P 에 있다고 가정하면, 레이저 슬릿의 경사각도  $\theta_B$  ( $\angle APO$ ) 는 다음과 같이 구해진다.

$$\theta_B = \tan^{-1} \left( \frac{l_A}{x_R + 2d} \right) \quad (23)$$

따라서 식(1), (2), (3), (8) 그리고 (9)에서  $l_A$ 와  $l_B$  대신에 다음과 같은  $l_A' (= \overline{O'A'})$  와  $l_B' (= \overline{A'B'})$  를 사용한다.

$$l_A' = (x_O + x_R + 2d) \tan \theta_B \quad (24)$$

$$l_B' = l_C \sin \theta_C - l_A' \quad (25)$$

따라서 수정된 3D 위치 계산식은 다음과 같이 얻어진다.

$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X' - x_O \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} \quad (26)$$

## 5. 결론

본 연구에서는 레이저 거리계의 CCD 카메라 영상면에서의 한

점이 작업면 위의 좌표점으로 맵핑되는 3차원 위치 계산식을 유도하였고, CCD 카메라가 작업면에 대해서 기울어지고 레이저 슬릿이 없는 경우의 최소 분해능을 계산하고, 이 결과를 레이저 슬릿이 있는 일반적인 경우의 레이저 거리계 최소 분해능 계산식으로 확장시켰다. 그리고 pin-hole 카메라 모델에 기초하여 CCD 카메라의 내부 매개변수와 이 매개변수를 이용한 레이저 슬릿 발생장치의 정확한 설계상수, CCD 카메라의 위치와 자세가 구해진 레이저 거리계의 정밀한 이론적 최소 분해능을 구하는 방법을 제안하였다.

## 참고문헌

- [1] Y.Tanaka etc., "High-speed processing for obtaining three-dimensional distance image and its application", IEEE/RSJ Intern. Workshop on Intelligent Robots and Systems IROS '91, Nov.3-5, pp.365-370, 1991.
- [2] S.Yuta etc., "Implimentation of an active optical range sensor using laser slit for in-door intelligent mobile robot", IEEE/RSJ Intern. Workshop on Intelligent Robots and Systems IROS '91, Nov.3-5, pp.415-420, 1991.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.