

# 실거리 파라미터 교정식 복합센서 기반 3차원 거리측정 시스템 3D Depth Measurement System based on Parameter Calibration of the Multi-Sensors

김 종 만, 김 원섭, 황종선, 김영민  
(Jong-man Kim and Won-sop Kim and Yeong-min Kim and Jong-sun Ilwang)

전남도립남도대학 컴퓨터응용전기과

**Abstract** : The analysis of the depth measurement system with multi-sensors(laser, camera, mirror) has been done and the parameter calibration technique has been proposed. In the proposed depth measurement system, the laser beam is reflected to the object by the rotating mirror and again the position of the laser beam is observed through the same mirror by the camera. The depth of the object pointed by the laser beam is computed depending on the pixel position on the CCD. There involved several number of internal and external parameters such as inter-pixel distance, focal length, position and orientation of the system components in the depth measurement error. In this paper, it is shown through the error sensitivity analysis of the parameters that the most important parameters in the sense of error sources are the angle of the laser beam and the inter pixel distance.

**Keywords** : depth measurement, multi-sensors(mono camera, mirror, laser), calibration, sensitivity

## I. 서 론

3차원 거리를 측정하는 방법 중 매우 잘 알려진 방법으로 는 인간의 눈과 같이 두 대의 카메라를 이용하여 거리를 측정하는 스테레오 비전과 두 대의 카메라 중 하나를 빛 투사기로 대체하여 거리를 측정하는 구조화 조명이 있다. 먼저 스테레오 비전 방식은 평행하게 설치된 두 대의 카메라로 받아들여진 두 장의 영상의 불일치함을 이용하여 좌우 영상의 동일한 점을 찾아 정합하여 거리를 측정하는 방식이다 [1]. 그러나 이러한 정합은 매우 어려운 문제로 이를 손쉽게 하기 위해 에지 매칭, 특징 점 매칭 등 많은 연구가 있어왔다. 두 번째, 구조화 조명은 빛 투사기와 카메라를 이용하여 거리를 측정하는 시스템으로 빛 투사기를 이용하여 물체에 빛의 패턴을 투사하고 카메라로 이를 받아들여 거리를 측정한다 [2][3]. 일반적으로 빛의 패턴으로는 다중선이나 그물망이 있는데 카메라로 받아들여진 연속적인 영상을 통하여 거리를 측정하기 위하여 동일 선을 찾는 단계가 필요하므로 스테레오 비전의 정합과 같은 문제가 발생하게 된다. 따라서 이를 해결하기 위하여 특정 패턴을 물체에 투사하거나 물체에 따라 그에 적합한 빛의 패턴을 투사하여 거리를 측정하는 연구 [4][5]가 계속되고 있다. 그러나 이러한 방법은 상대적으로 해상도가 매우 낮다는 문제점이 있기 때문에 이를 해결하기 위하여 빛 투사기를 회전 시켜서 물체를 스캔(scan)하는 방법도 연구되었다 [6][7]. 그러나 이 방법 또한 빛의 회전에 인하여 영상에 빛의 블러(blur)가 생기게 된다는 문제점을 가지고 있으며, 이는 정확한 거리측정을 방해하는 요인이 된다. 또 다른 문제점은 빛 투사기 각도가 거리 측정 계산식에 사용되므로 이에 따라 거리 측정에 정확성이 생기게 된다.

본 논문에서는 단일 카메라와 레이저가 비 평행으로 구성되어 있고, 맞은 편에 회전하는 평면경으로 이루어진 새로운 거리 측정 시스템을 소개하였다. 본 시스템은 레이저 각도에 따른 부정확성을 캘리브레이션(calibration)을 통하여 최소화할 수 있으며, 거리 측정 시 레이저 빛에 블러(blur)가 생기지 않는다는 장점을 가지고 있다. 또한 각 파라미터에 따른 민감도 분석을 통하여 화소 위치와 레이저 각도 파라미터가 거리 오차의 주요 원인임을 파악하였다.

이 논문의 II절에서는 제안한 거리 측정 시스템의 원리에 대하여 설명하고, 시스템의 내부 파라미터와 외부 파라미터를 위한 캘리브레이션(calibration)에 대하여 III 절에서 설명하였다. IV 절은 민감도 분석이고 V절은 실험결과, VI절은 결론이다.

## II. 제안한 거리측정 시스템의 원리

제안한 거리측정 시스템은 그림 1과 같이 비 평행으로 단일 카메라와 레이저가 있고, 맞은 편에 회전하는 평면경으로 구성되어 있어서 레이저 빛이 회전 평면경에 투사되고 측정하고자 하는 영역에 빛이 반사되고 반사된 빛은 다시 거울에 투영되어 CCD 카메라를 통하여 받아들여지는 구조를 갖는다.

그림 1에서 볼 수 있듯이 레이저 빛은 평면경을 통해 임의의 물체의 점 T에 반사되고, 거울 영상인 점 T'에 빛이 맺힌다. 거울 각이  $\theta$ 일 때, 투사된 빛과 반사된 빛 사이의 각인 SOT는  $2(\theta - \zeta)$ 이고 각 TOM는  $(90^\circ - \theta + \zeta)$ 이다. T'가 T의 거울 영상이기 때문에  $T'OM = TOM = 90^\circ - \theta + \zeta$ 가 성립한다.  $SOT' = 2(\theta - \zeta) + 2(90^\circ - \theta + \zeta) = 180^\circ$  이므로

T'는 항상 레이저 빛의 선상에 위치하게 된다. 이것은 회전 평면경의 회전을 통하여 전 방향의 거리를 측정하는데 있어 거리에 급격한 변화가 없다면, 레이저 빛은 블러(blur)가 일어나지 않는다는 것을 의미한다.

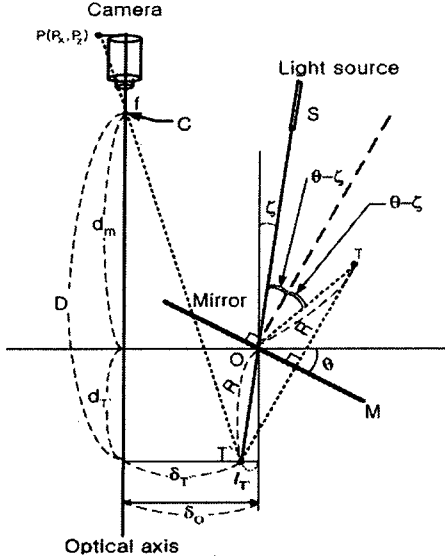


그림 1. 제한한 거리측정 시스템의 기하학적 원리  
Fig. 1. The principle of the depth measurement system composed by the rotating mirror, mono camera and a laser beam.

그림 1에서 카메라와 평행한 수직 축과 레이저 빛 사이의 각을  $\zeta$ 로 표시하고, 수평 축과 거울 사이의 각을  $\theta$ , 카메라 축과 회전 평면경 사이의 거리를  $\delta_0$ , 카메라의 초점과 수평 축 사이의 거리를  $d$ , 카메라의 초점 거리는  $f$ 로 표시하였다. 그림에서 볼 수 있듯이 거울에 의해 반사된 레이저 포인트가 3차원의 임의의 물체에 맺힌 점 T가 CCD 카메라에 의해 영상의 한 점 P( $p_x, p_y$ )에 맺혀진다고 할 때, 삼각형의 닳음 공식에 의해 아래와 같은 비가 성립하게 된다.

$$p_x : f = \delta_T : D \quad (1)$$

식 (1)을 정리하면,

$$p_x(d_m + d_T) = f\delta_T \quad (2)$$

가 되고,

$d_T = R\cos\zeta$ ,  $\delta_T = \delta_0 - l_T$ ,  $l_T = R\sin\zeta$  이므로 식 (2)에 대입하여 정리하면,

$$p_x(d_m + R\cos\zeta) = f(\delta_0 - R\sin\zeta) \quad (3)$$

이고, 식 (3)을 R로 정리하면

$$R = \frac{f\delta_0 - p_x d_m}{f\sin\zeta + p_x \cos\zeta} \quad (4)$$

를 얻을 수 있다.

식 (4)에서 거울 각도는 계산에 사용되지 않으며 레이저의 각도  $\zeta$ 는 거리 측정에 민감한 요소이므로 식 (4)를 이용하여 거리를 계산하기 전에 캘리브레이션(calibration)해야 한다.

### III. 파라미터 캘리브레이션

거리 R을 계산하는데 식 (4)를 사용하기 위해서는 시스템 파라미터들이 측정되고 캘리브레이션(calibration) 되어야 한다.  $\delta_0$ 와  $d_m$ 은 실험의 설치 시 측정되는 파라미터 들이고, 그 밖에  $f$ 를 포함하여 CCD 센서의 내부 셀 거리  $\delta_{cell}$ 와 레이저의 각도  $\zeta$ 의 값이 필요하다. 본 시스템의 거리측정 정확도는 레이저의 각도  $\zeta$ 의 오차에 매우 민감하기 때문에  $\zeta$ 를 직접적으로 구할 수 없으며, 이는 캘리브레이션(calibration)을 통하여 정확하게 결정되어야 한다. 또한 CCD의 내부 셀 거리  $\delta_{cell}$ 와 초점 거리  $f$ 와 같은 내부 파라미터들의 정확한 값을 알 수 없기 때문에 캘리브레이션(calibration)을 통하여 거리측정 식에 사용할 수 있다.

#### 3.1 내부 파라미터 k의 캘리브레이션

내부 파라미터 캘리브레이션(calibration)을 하기 위하여 식 (4)를 변경하면 다음과 같다. 먼저 그림 1(b)에서 영상의 중심으로부터 점 P까지의 거리인  $p_x$ 와 일치하는 픽셀 수를 정수  $n_x$ 로 가정하면  $p_x$ 는 픽셀 수와 픽셀의 한 픽셀 당 내부 셀 거리의 곱으로 나타낼 수 있다. 따라서 식 (4)는

$$R = \frac{f\delta_0 - \delta_{cell}n_x d_m}{f\sin\zeta + \delta_{cell}n_x \cos\zeta} = \frac{\frac{f}{\delta_{cell}}\delta_0 - n_x d_m}{\sin\zeta + n_x \cos\zeta} \quad (5)$$

와 같이 나타낼 수 있고,  $k = \frac{f}{\delta_{cell}}$ 로 정의하면, 측정하고자 하는 거리 R은 다음 식과 같이 구해진다.

$$R = \frac{k\delta_0 - n_x d_m}{k\sin\zeta + n_x \cos\zeta} \quad (6)$$

실험은 거리 R=50, 100, 150, 200, ..., 500cm일 때 수행되었으며, 카메라와 레이저 포인트는 평행( $\zeta = 0^\circ$ )으로 설치되어 있다.  $\zeta$ 를  $0^\circ$ 로 맞추기 위하여 레이저 포인트의 축과 카메라의 광축의 평행 연장 선(R=500cm 이상) 사이의 거리가  $\delta_0$ 로 유지되도록 레이저의 방향을 조정한다. 파라미터 k의 값을 얻기 위해 실험을 통하여 이미 알고 있는 값인  $\zeta$ ,  $\delta_0$ ,  $d_m$  R을 식 (6)에 대입하고, 계산된 k값들의 평균값이 캘리브레이션 상수(calibration constant) k로 사용된다. 이 파라미터는 거리 측정하기 전에 미리 캘리브레이션(calibration)하는 것이 필요하다.

### 3.2 외부 파라미터 $\zeta$ 의 캘리브레이션

시스템에서 레이저 각도  $\zeta$ 를 구하기 위하여 식 (4)를  $\zeta$ 로 정리하면,

$$\zeta = \sin^{-1}\left(\frac{f\delta_0 - p_x d_m}{\sqrt{p_x^2 R^2 + f^2 R^2}}\right) - \sin^{-1}\left(\frac{p_x R}{\sqrt{p_x^2 R^2 + f^2 R^2}}\right) \quad (7)$$

를 얻을 수 있는데, 이 식에서 이미 알고 있는 거리 R 과 영상으로부터 얻을 수 있는  $n_x$  실험 시 설치를 통해 측정되는 값인  $\delta_0$ 와  $d_m$ , 캘리브레이션(calibration)을 통해 구해진 상수  $k$ 가 주어지므로 결과적으로 변수  $\zeta$ 는 계산이 가능하다. 레이저의 각도  $\zeta$  또한 거리를 계산하기 전에 미리 캘리브레이션(calibration)을 하여 정확한 값을 구한 뒤 사용해야 한다.

## IV. 민감도 분석

이 절에서는  $\zeta$ 와  $p_x$ 에 대한 거리 측정 오차 민감도를 유도하고, 이를 통하여 시스템의 특성을 해석하였다.

### 4.1 $\zeta$ 에 대한 거리측정 민감도

$\zeta$ 에 대한 거리측정 민감도는 식 (4)의 미분을 통해 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial R}{\partial \zeta} = \frac{-(f \cos \zeta - p_x \sin \zeta)(f \delta_0 - p_x d_m)}{(f \sin \zeta + p_x \cos \zeta)^2} \quad (8)$$

$$= \frac{-f \cos \zeta + p_x \sin \zeta}{f \sin \zeta + p_x \cos \zeta} \cdot R$$

$\zeta$ 가  $0^\circ$ 이거나 매우 작은 값이라면 식 (9)은 아래와 같이 간단하게 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial R}{\partial \zeta} = \frac{-f \cos \zeta + p_x \sin \zeta}{f \sin \zeta + p_x \cos \zeta} \cdot R \approx \frac{-f \cdot R}{p_x} \quad (9)$$

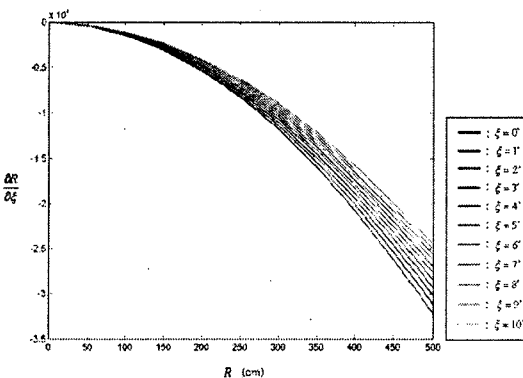


그림 2 서로 다른  $\zeta$ 에 대하여  $\zeta$ 에 따른 거리측정 오차 민감도

Fig. 2. Sensitivity of the depth measurement with respect  $\zeta$  to for different  $\zeta$ .

식 (9)에서  $f$ 의 값은 일반적으로  $p_x$ 보다 크기 때문에 식 (8)은  $\zeta$ 가 커질수록 덜 민감하다는 사실을 보여준다. 그러나  $p_x$ 는 R에 대한 함수이므로 식 (8)을 통해 민감도를 해석하는 것은 쉽지 않다. 따라서  $d_m$ ,  $\delta_0$ ,  $k$  이 각각 15cm, 8cm, 1377.56 로 두고, 식 (8)와 식 (3)을 이용하여  $\zeta$ 에 대한 민감도를 계산하면 결과는 그림 2과 같이 나타난다.

그림 2를 통하여  $\zeta = 4^\circ$ 이고 R = 500cm 일 때,  $\zeta$ 가 대략  $-2.8 \times 10^4$  cm/radian 임을 알 수 있으며,  $\zeta$ 가  $0.1^\circ$  (0.00175 radians) 만큼의 오차가 있을 때 그에 따른 거리 오차는 대략  $0.00175 \times 2.8 \times 10^4 = 49$ cm 가 됨을 알 수 있다. 다행히도 실험을 통해 캘리브레이션(calibration)에 의해 0.1 보다 나은 정확도를 가지게 됨을 알 수 있으며, 근거리에서의 거리 측정 에러는 보다 작게 나타난다.

### 4.2 $P_x$ 에 따른 거리측정 민감도

위와 비슷하게  $p_x$ 의 민감도는 아래와 같이 유도할 수 있다.

$$\frac{\partial R}{\partial p_x} = \frac{-d_m(f \sin \zeta + p_x \cos \zeta) - (\cos \zeta)(f \delta_0 - p_x d_m)}{(f \sin \zeta + p_x \cos \zeta)^2} \quad (10)$$

$$= \frac{-d_m - \cos \zeta \cdot R}{f \sin \zeta + p_x \cos \zeta}$$

식 (10)는  $\zeta$ 가 커질수록 민감도가 낮아짐을 나타내고 있다. 하지만 카메라의 시야각에 제한이 있기 때문에  $\zeta$ 의 영역에 제한이 있게 된다. 식 (10)와 식 (3)을 통해 얻어진 레이저 각  $\zeta$ 에 따른 민감도의 곡선이 그림 3에 나타난다.

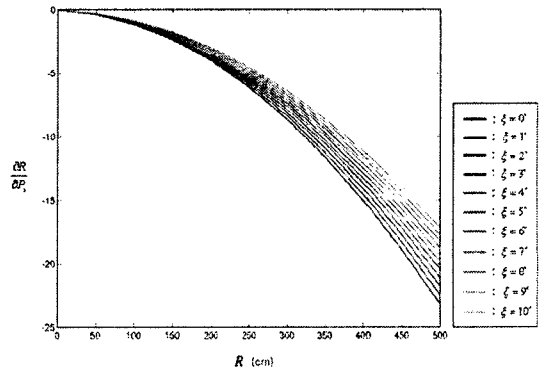


그림 3 서로 다른  $\zeta$ 에 대하여  $p_x$ 에 따른 거리측정 오차 민감도 ( $P_x = p_x / \delta_{cell}$ )

Fig. 3. Sensitivity of the depth measurement with

respect to  $P_x$  for different , where  $P_x = p_x / \delta_{cell}$

파라미터  $d_m, \delta_0, k$  은 각각 15cm, 8cm, 1377.56으로 초기화 되어 있다. 이 민감도의 곡선은  $p_x / \delta_{cell}$  로 정의된  $P_x$  을 이용한 곡선으로  $\zeta = 4^\circ$  에서 한 픽셀의 오차가 거리 500cm에서 20cm 정도의 거리 오차 요인이 됨을 알 수 있다.

### V. 실험 결과

이 절에서는 실험 결과가 기술된다. 실험을 위하여 파라미터  $d_m, \delta_0$  는 각각 15cm, 8cm 로 설치하고, 앞서 III 절에서 기술한 방법을 이용하여 계산된 캘리브레이션(calibration) 상수  $k$  의 값은 1377.56 이다. 거리 측정 실험을 위해  $\zeta = 4^\circ$  로 가정된다. 하지만  $\zeta$  가 정확히  $4^\circ$  가 될 수 없으므로 캘리브레이션(calibration)을 통하여 R=500일 때 실제  $\zeta$  는  $3.865^\circ$  로 계산된다. 그림 3은 R이 50cm에서 500cm까지일 때, 캘리브레이션(calibration)되지 않은 레이저 각도  $\zeta = 4^\circ$  를 이용하여 계산된 거리 오차와 캘리브레이션(calibration) 된 각도  $\zeta = 3.869^\circ$  를 이용할 때의 거리 오차에 대한 비교 그래프이다. 실험을 통하여 캘리브레이션(calibration)의 중요성을 알 수 있다.

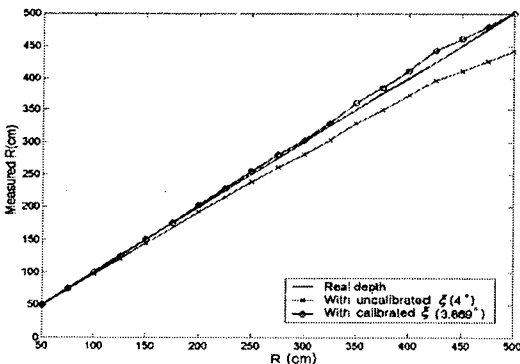


그림 4. 캘리브레이션(calibration) 한  $\zeta$  와 캘리브레이션(calibration) 하지 않은  $\zeta$  를 이용한 거리측정 오차  
Fig. 4. Results with and without having  $\zeta$  calibrated.

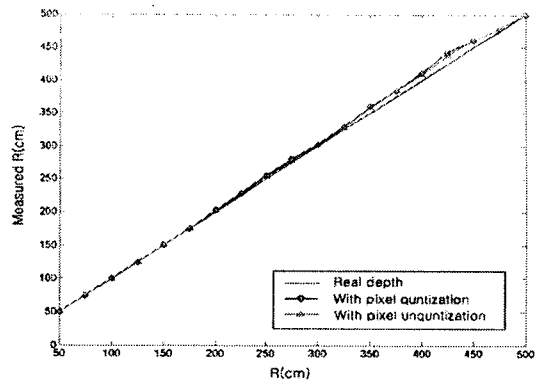


그림 5 양자화 오차 그래프  
Fig. 5. Quantization error graph

또한 픽셀 수가 정수이기 때문에 나타나는 양자화 오차 또한 거리 측정의 정확성에 영향을 끼치는 중요한 요소가 된다. 그에 따른 오차를 확인하기 위하여 물체에 맺힌 레이저 중심의 값을 소수점 아래 한 자리까지 사용하므로 오차를 분석하였다. 실험을 위하여 레이저의 시작점과 끝점을 찾아 이등분한 값을 사용하였다. 그림 5는 레이저 중심 값을 정수로 사용하여 계산된 거리 오차와 레이저의 중심 값을 소수점 아래 한 자리까지 확장하여 이를 이용하여 계산된 거리 오차의 비교 그래프이다. 실험을 통하여 레이저의 중심 값을 양자화 하지 않은 경우 더 정확한 거리측정이 됨을 알 수 있다.

### VI. 결론

3차원 거리측정을 위하여 간단한 알고리즘을 이용하여 거리를 측정할 수 있었으며, 회전 평면경을 이용하여 레이저 빛을 스캔하므로 전 방향을 거리 측정할 수 있는 시스템으로 레이저 빛에 블러(blur)를 제거하는 시스템을 제안하였다. 본 논문에서는 제안한 거리측정 시스템의 외부 파라미터와 내부 파라미터 캘리브레이션(calibration)을 제안하므로 보다 정확한 거리측정이 가능하도록 하였다. 또한 민감도 분석을 통하여 제안한 거리측정 시스템의 거리오차에 민감한 파라미터를 분석하고 이에 따른 방안으로 앞서 언급한 캘리브레이션(calibration)을 통하여 거리 오차를 최소화 하였다.

### 참고문헌

- [1] W. Eric L. Grimson, "Computational experiments with a feature based stereo algorithm," *IEEE Transactions on Patt Analysis and Machine Intelligence*, PAMI-7, no. 1, pp. 17, Jan, 1985.
- [2] L. Zhang, B. Curless and S. M. Seitz, "Spacetime stereo: Shape recovery for dynamic scenes," *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, vol. 2, pp. II-367-74, 2003.

- [3] S. M. Dunn, R. L. Keizer, and J. Yu, "Measuring the area and volume of the human body with structured light," *IEEE Tr. on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 19, no. 6, pp. 1350-1364, Nov./Dec. 1989.
- [4] D. Caspi, N. Kiryati, "Range image with adaptive color structured light," *IEEE Transactions on Patt Analysis and Machine Intelligence*, vol. 20, no 5, pp. 470, May, 1998.
- [5] J. Pages, J. Salvi, R. Garcia, and C. Matabosch, "Overview of coded light projection techniques for automatic 3D profiling," *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 133-138, September 2003.
- [6] Y. Shirai and M. Suwa, "Recognition of polyhedrons with a rangefinder," *International Joint Conference on Artificial Intelligence*, pp.80-87, 1971.
- [7] T. C. Strand, "Optical three-dimensional sensing for machine vision," *Optical Engineering*, vol. 24, no.1, pp. 33-40, 1985.