

# 단일카메라 전방향 스테레오 비전 시스템을 이용한 거리측정

## Depth Measurement using an Omnidirectional Stereo Vision System with a Single Camera

이수영\*, 김순철  
(Soo-Yeong Yi<sup>1</sup> and Soon-Chul Kim<sup>1</sup>)

<sup>1</sup>Dept. of Electrical and Information Engineering, Seoul National University of Science and Technology

**Abstract:** It is possible to obtain an omnidirectional stereo image via a single camera by using a catadioptric approach with a convex mirror and concave lens. In order to measure three-dimensional distance using the imaging system, the optical parameters of the system are required. In this paper, a calibration procedure to extract the parameters of the imaging system is described. Based on the parameters, experiments are carried out to verify the performance of the three-dimensional distance measurement of a single camera omnidirectional stereo imaging system.

**Keywords:** catadioptric, omnidirectional image, stereo, single camera, reflection, refraction

### I. 서론

한 장의 영상에 가능한 한 많은 영상정보를 담기 위해서는 넓은 시야각(FOV: Field-Of-View)이 필요하다. 거울과 기존 카메라를 조합하여 영상을 얻는 방법을 catadioptric 방식이라 하는데, 360도 모든 방향의 시야각을 갖는 전방향 영상 시스템을 구성하는데 많이 사용된다[1]. 한편 서로 다른 시점(view point)를 갖는 두 장의 전방향 영상을 획득하는 스테레오 영상 시스템은 한번에 360도 모든 방향의 3차원 거리정보를 얻을 수 있다는 특징이 있다. 지금까지 제안된 전방향 스테레오 영상시스템을 광학계의 조합방식에 따라 정리하면 다음과 같다.

- (1) 두 대의 카메라와 두 개의 전방향 거울을 이용하여 구성하는 방법[2,3]
- (2) 두 대의 카메라, 한 개의 전방향 거울과 별도의 빔 스플리터를 이용한 방법[4]
- (3) 한 대의 카메라와 두 곡면을 갖는 거울을 이용한 방법 [5-7]
- (4) 한 대의 카메라와 두 개의 곡면 거울을 이용한 방법 [8,9]
- (5) 한 대의 카메라와 곡면거울/오목렌즈 조합을 이용한 방법[10]

한 대의 카메라로 전방향 스테레오 영상을 획득하는 방법은 하나의 영상센서를 분할하는 것이므로 상대적으로 화질이 좋지 않고, 또한 스테레오 영상간의 작은 시각편차(disparity) 때문에 거리측정 정밀도가 높지 않다는 단점이 있다. 그러나 영상시스템 구축이 용이하고 경제적인 뿐만 아니라 스테레오 영상간에 초점거리, 명도 등과 같은 내재 변수

(intrinsic parameters)가 동일하고, 에피폴라 선이 정렬되므로 스테레오 정합이 용이하다는 장점이 있다. 특히 [10]에서는 곡면거울과 오목렌즈의 조합에 의한 광반사 및 굴절 특성을 이용하여 한 대의 카메라로 전방향 스테레오 영상을 얻는 방법을 제시하였다. 이 방법은 이미 상용화되어 있는 볼록 거울과 오목 렌즈를 이용하므로 전방향 스테레오 영상 시스템을 간단히 구축할 수 있으며, 경제적이라는 장점이 있다.

본 논문에서는 (5)와 같은 단일 카메라 전방향 스테레오 영상 시스템에서 3차원 거리계산에 필요한 매개변수들을 사전 캘리브레이션을 통해 추출하고, 이를 이용하여 실험을 통해 거리측정 성능을 검증하고자 한다. 또한 얻어진 매개변수들을 기반으로 본 스테레오 영상시스템의 거리측정 정밀도를 분석함으로써 적용가능 범위 해석을 제시한다. [10]에서는 이론적인 거리계산식을 유도하였으며 실험을 통한 거리측정 결과가 부족하였다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. II 장에서 단일 카메라 전방향 스테레오 영상 시스템의 광학원리에 대해 간단히 소개하고, III 장에서 영상시스템의 매개변수 추출 방법을 제시한다. 그리고 IV 장에서 실험을 통해 거리측정 성능을 검증한 후, V 장에서 결론을 맺는다.

### II. 단일 카메라 전방향 스테레오 영상 시스템

본 절에서는 이해를 돕기 위하여 단일 카메라 전방향 스테레오 영상획득 시스템의 3차원 거리계측 원리를 그림 1을 통해 간단히 설명한다[10]. 제안하는 영상 시스템은 전방향성 볼록 거울과 오목렌즈의 광반사 및 굴절 특성을 이용한 것이다. 전방향 거울로는 일반적으로 많이 사용되는 쌍곡면형(hyperbolic) 거울을 채택하였다. 그림 1에서 물체점  $P_o(r, z)$ 는 3차원 좌표를 원통좌표계로 나타낸 것이며, 방향각은 전방향 영상계에서 그대로 유지되므로 나타나지 않았다.

주변 물체점  $P_o(r, z)$ 로 부터 시작된 경로 I 방향의 빛은 하부의 볼록 거울면에 반사되고 카메라 핀홀을 거쳐 영상면에 상을 맺게 된다. 한편 거울면에 반사된 경로 II 방향의 빛

\* 책임저자(Corresponding Author)

Manuscript received August 20, 2013 / revised September 15, 2013 / accepted October 4, 2013

이수영, 김순철: 서울과학기술대학교 전기정보공학과  
(suylee@seoultech.ac.kr/soonchulss@naver.com)

※ 본 연구는 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업(2011-0009113) 지원에 의하여 수행되었음.

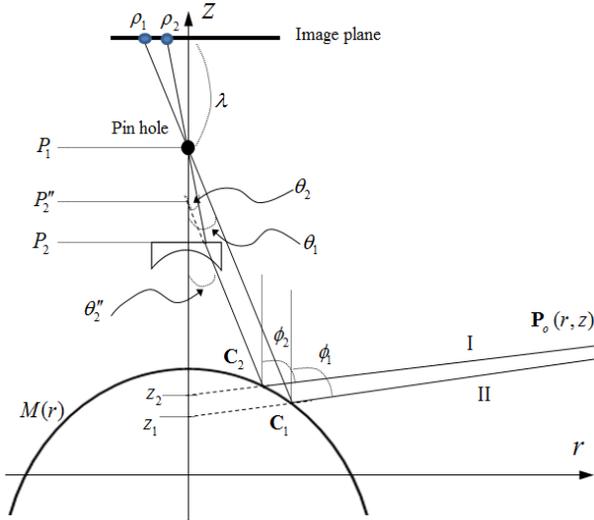


그림 1. 스테레오 영상에 의한 거리계산 [10].  
Fig. 1. Distance computation from stereo image pair [10].

표 1. 영상 시스템의 매개 변수.

Table 1. Parameters of the imaging system.

항목	기호
카메라 렌즈의 초점거리	$f$
카메라 핀홀까지의 높이	$P_1$
오목렌즈까지의 높이	$P_2$
오목렌즈의 초점거리	$f$
전방향 거울의 쌍곡선 함수	$a, b$ 및 $d$

은 오목렌즈에 의해 굴절되어 핀홀을 통과하게 되며, 영상면에 상을 맺는다. 경로 I과 경로 II의 빛은 동일 물체점에서 나온 것이므로 영상면에 맺히는 상은 결과적으로 시각편차(disparity)를 갖는 한 쌍의 스테레오 영상점을 형성하게 된다. 영상면에서 두 영상점은 볼록거울의 반사법칙과 오목렌즈를 통한 굴절법칙을 따르므로, 광학식을 통해 물체점  $P_o(r, z)$  의 3차원 좌표를 계산할 수 있다.

우선 영상 시스템에 관련된 매개변수들은 표 1과 같다. 표에서 첫 번째 항목은 카메라 자체에 관한 것이며, 나머지 항목들은 전방향 스테레오 영상을 얻기 위한 광학계에 관한 것이다.

그리고 영상면에서 물체점  $P_o(r, z)$  에 해당하는 스테레오 영상점의 측정값은 다음과 같다:

- 영상면에서 광축(optical center)으로부터의 거리:  $\rho_1, \rho_2$

먼저 그림 1의  $r-z$  좌표계에서 쌍곡선 함수는 다음 식과 같이 표현된다:

$$\frac{(z-d)^2}{a^2} - \frac{r^2}{b^2} = 1 \tag{1}$$

스테레오 영상점의 측정값으로부터 그림 1에서 각 광경로의  $\theta_1$  과  $\theta_2$  는 다음과 같이 구할 수 있다:

$$\theta_1 = \tan^{-1}\left(\frac{\rho_1}{\lambda}\right), \quad \theta_2 = \tan^{-1}\left(\frac{\rho_2}{\lambda}\right) \tag{2}$$

오목렌즈에 의한 굴절로 인해 경로 II의 직선에 대해서 다음 식이 성립한다:

$$P_2'' = \frac{f \cdot (P_1 - P_2)}{f + P_1 - P_2} + P_2 \tag{3}$$

$$\theta_2'' = \tan^{-1}\left(\frac{f + P_1 - P_2}{f} \cdot \tan \theta_2\right) \tag{4}$$

이제 위 식들을 정리하면 물체점  $P_o(r, z)$  의 좌표는 다음 연립방정식 (5)의 해로서 식 (6)과 같이 표현된다:

$$\text{- 경로 I: } z = \cot \phi_1 \cdot r + z_1 \tag{5-1}$$

$$\text{- 경로 II: } z = \cot \phi_2 \cdot r + z_2 \tag{5-2}$$

$$\begin{bmatrix} r \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cot \phi_1 & -1 \\ \cot \phi_2 & -1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} -z_1 \\ -z_2 \end{bmatrix} \tag{6}$$

여기서 각 변수들은 다음과 같이 구할 수 있다:

$$\begin{aligned} \phi_1 &= \theta_1 + 2 \tan^{-1}\left(-\frac{a}{b} \cdot \frac{r_{C1}}{\sqrt{r_{C1}^2 + b^2}}\right), \\ z_1 &= z_{C1} - \cot \phi_1 \cdot r_{C1}, \\ \phi_2 &= \theta_2'' + 2 \tan^{-1}\left(-\frac{a}{b} \cdot \frac{r_{C2}}{\sqrt{r_{C2}^2 + b^2}}\right), \\ z_2 &= z_{C2} - \cot \phi_2 \cdot r_{C2}, \\ r_{C1} &= \frac{b^2 \cot \theta_1 (P_1 - d) + ab \sqrt{(P_1 - d)^2 + b^2 \cot^2 \theta_1 - a^2}}{b^2 \cot^2 \theta_1 - a^2}, \\ r_{C2} &= \frac{b^2 \cot \theta_2'' (P_2'' - d) + ab \sqrt{(P_2'' - d)^2 + b^2 \cot^2 \theta_2'' - a^2}}{b^2 \cot^2 \theta_2'' - a^2}, \\ z_{C1} &= -\cot \theta_1 \cdot r_{C1} + P_1 \\ z_{C2} &= -\cot \theta_2'' \cdot r_{C2} + P_2'' \end{aligned} \tag{7}$$

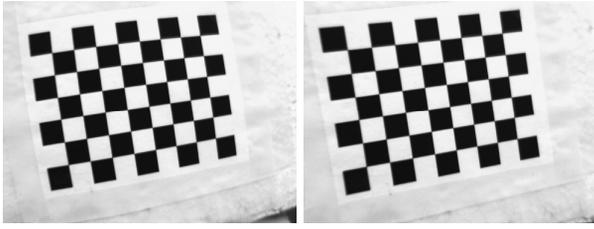
윗 식에서  $C_1(r_{C1}, z_{C1})$  과  $C_2(r_{C2}, z_{C2})$  는 경로 I과 경로 II의 광직선이 쌍곡면형 거울과 교차하는 점을 의미한다.

### III. 캘리브레이션

영상시스템에 있어서 매개변수 캘리브레이션은 미리 크기와 모양을 알고 있는 기준 패턴과 이를 영상시스템을 통해 관측한 패턴을 비교함으로써 영상획득 과정에 관련된 매개변수들을 역으로 추출하는 것이다. 본 논문에서는 표 1의 매개변수들을 추출하는 과정을 (1) 카메라 자체의 내재 매개변수[11] 추출 과정과 (2) 전방향 스테레오 영상 광학계에 관련된 매개변수 추출 과정, 그리고 (3) 통합 보정의 3단계로 나누어 진행하였다.

• 1 단계: 카메라 자체 캘리브레이션

표 1에서 기술하지는 않았지만 일반적으로 카메라 영상은 카메라 렌즈에 의한 방사왜곡(radial distortion) 및 접선왜곡(tangential distortion)을 포함하고 있다. 앞서 2절에서 기술한 거리 계산식은 이상적인 카메라 핀홀 모델을 기반으로 하고 있으므로, 영상 왜곡을 보정하고, 영상면에서 광 중심점(principal point) 좌표와 카메라 렌즈의 초점거리,  $\lambda$  를 구하기 위한 작업이 선행되어야 한다. 이를 위해 본 논문에서는 잘



(a) Before rectification. (b) After rectification.

그림 2. 카메라 캘리브레이션 [11].

Fig. 2. Camera calibration [11].

표 2. 쌍곡면형 거울의 사양[1].

Table 2. Specification of hyperbolic mirror.

사양	$a$	$b$	$d$	밑면반지름 $\psi_2$
값(mm)	28.095	23.4125	45.6654	30.0

표 3. 오목 렌즈의 사양.

Table 3. Specification of concave lens.

사양	초점거리 $f$	반지름 $\psi_1$
값(mm)	50.0	25.0

알려진 매트랩의 카메라 캘리브레이션 툴박스[11]를 사용하였다. 카메라 캘리브레이션 결과로부터 카메라 자체는 왜곡이 없는 이상적인 핀홀 영상장치로 간주할 수 있으며(그림 2), 또한 표 1의 매개변수  $\lambda$ 가 얻어진다.

•2단계: 전방향 스테레오 영상 광학계 캘리브레이션

표 1에 기술한 매개변수들 중에서 쌍곡면형 전방향 거울에 관련된 매개변수들은 거울제작사로부터 높은 정밀도로 주어진다. 이를 표 2에 정리하였다.

또한 오목렌즈의 초점거리,  $f$ 와 반지름 길이도 다음 표와 같이 렌즈 제작사로부터 주어진다.

일단 1단계에서 구한 카메라의 초점거리,  $\lambda$ 를 이용하여 나머지 시스템 변수  $P_1$  및  $P_2$ 를 다음과 같이 구할 수 있다. 즉, 그림 3에서 전방향 거울과 오목렌즈의 실제 지름과 영상면에 맺힌 상의 크기 사이에는 다음의 비례식이 성립된다:

$$\begin{aligned} \varphi_1 : \lambda &= \psi_1 : P_1 \\ \varphi_2 : \lambda &= \psi_2 : P_1 - P_2 \end{aligned} \quad (8)$$

여기에서  $\psi_1$  과  $\psi_2$  는 각각 전방향 거울과 오목렌즈의 반지름을 의미하여,  $\varphi_1$  과  $\varphi_2$  는 영상면에서 해당 화소까지의 길이를 나타낸다.

식 (8)로부터 시스템 변수  $P_1$  및  $P_2$ 는 다음과 같이 구할 수 있다:

$$P_1 = \frac{\lambda \cdot \psi_1}{\varphi_1}, \quad P_2 = \frac{\lambda \cdot \psi_1}{\varphi_1} - \frac{\lambda \cdot \psi_2}{\varphi_2} \quad (9)$$

위의 1, 2단계를 통해 얻은 매개변수의 값을 표 4에 정리한다.

•3단계: 통합 보정

일반적으로 오목렌즈와 카메라렌즈의 초점거리는 오차가 크므로 이를 기반으로 추출한 매개변수  $P_1$  및  $P_2$  값도 큰 오

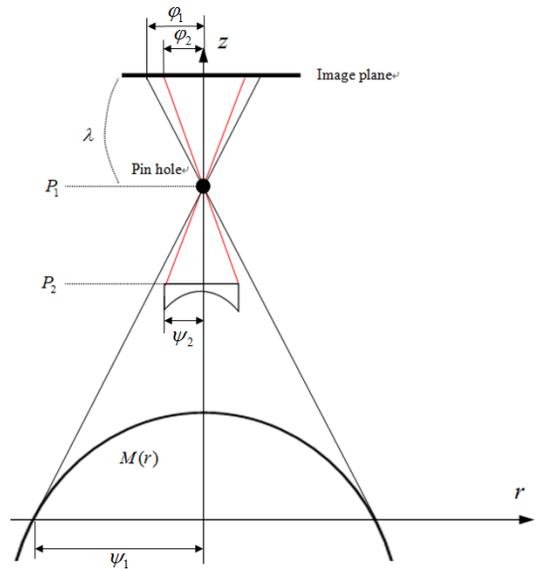


그림 3. 시스템 변수  $P_1$  및  $P_2$ .

Fig. 3. System parameters  $P_1$  and  $P_2$ .

표 4. 매개변수 추출값.

Table 4. Extracted parameter values.

매개변수	$P_1$	$P_2$	$f$	$\lambda$
값(mm)	166.06	31.42	50.0	2585.01

차를 갖게 된다. 따라서 본 논문에서는 앞서 구한 매개변수의 값들을 통합적으로 보정하기 위해 기준 격자 패턴과 이를 관측한 영상을 비교하는 최소제곱오차(Least-squared-error) 과정을 적용하였다.

식 (6)의 거리 계산식은 다음 식과 같이 영상 측정값과 매개변수들의 함수로 나타낼 수 있다:

$$\begin{aligned} r &= f_r(\rho_1, \rho_2, P_1, P_2, \lambda, f), \\ z &= f_z(\rho_1, \rho_2, P_1, P_2, \lambda, f) \end{aligned} \quad (10)$$

격자 패턴 각 꼭지점들의 좌표를 원점을 기준으로 원통좌표계  $(r_{ref}, z_{ref})$ 로 변환하고 식 (11)과 같이 제곱오차를 정의한다. 전술한 바와 같이 방향각은 고려할 필요가 없다:

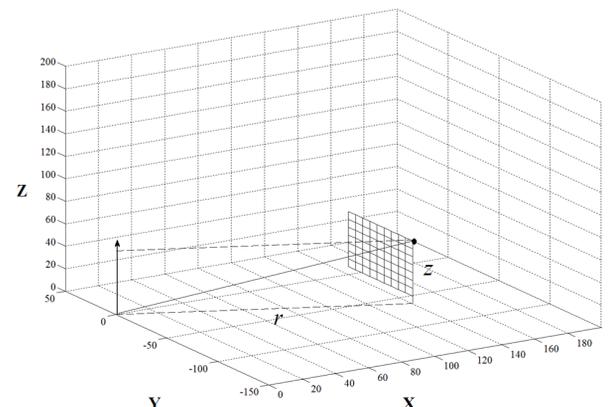


그림 4. 캘리브레이션을 위한 격자 패턴.

Fig. 4. Grid pattern for parameter calibration.



그림 5. 실험장치.  
Fig. 5. Experimental setup.

$$E = \sum_{i,j} \left\{ \left( r_{ref}^{i,j} - f_r(\rho_1^{i,j}, \rho_2^{i,j}, P_1, P_2, \lambda, f) \right)^2 + \left( z_{ref}^{i,j} - f_z(\rho_1^{i,j}, \rho_2^{i,j}, P_1, P_2, \lambda, f) \right)^2 \right\} \quad (11)$$

위 식에서 위 첨자  $(i, j)$ 는 격자 패턴의 각 꼭지점을 나타낸다. 이제 각 매개변수들에 대해서 식 (12)와 같은 그래디언트(gradient) 방법을 이용하여 제곱오차가 최소가 되는 값을 반복적인 탐색을 통해 추출할 수 있다.

$$a_{k+1} = a_k + \Delta_a \cdot \frac{\partial E}{\partial a_k}, \quad k = 1, 2, 3 \dots \quad (12)$$

식 (12)에서  $a$ 는 표 1의 매개변수들을 나타내며,  $\Delta_a$ 는 탐색 스텝의 크기를 의미한다. 거리 계산식 (6)이 매우 복잡하여 각 매개변수에 대한 그래디언트를 해석적으로 구하기 어려우므로, 여기에서는 다음과 같이 근사적으로 구하였다[12].

$$\frac{\partial E}{\partial a} \approx \frac{E(a + \Delta a) - E(a)}{\Delta a} = \frac{\Delta E}{\Delta a} \quad (13)$$

즉 매개변수의 미소변화에 대해서 오차의 미소변화를 구하고, 이로부터 근사적인 미분값을 얻는 방법이다[12]. 탐색에 필요한 매개변수의 초기값들은 전 단계에서 구한 값으로 설정한다.

**IV. 실험결과**

다음 그림은 위에서 설명한 단일 카메라 전방향 스테레오 영상장치이다.

그림 6은 격자 패턴의 스테레오 영상이다. 그림에서 보는 바와 같이 대응되는 두 영상점,  $\rho_1$  과  $\rho_2$ 는 영상의 광 중심점을 기점으로 반지름 선상에 함께 놓이므로 쉽게 대응점을 찾을 수 있다. 본 논문에서는 스테레오 대응점 정합(matching) 알고리즘 개발을 목적으로 하고 있지는 않으므로 화면상에서 수작업을 통해 대응점을 정합하였다.

그림 7은 위 영상에서 측정된 대응점들의 화소거리 값 ( $\rho_1, \rho_2$ )와 거리식 (6)을 이용하여 구한 좌표값,  $(r, z)$ 를 다시 직교 좌표계로 변환하여 그린 것이다.

그림에서 볼 수 있는 바와 같이 측정거리 ~150mm에서 약 ~10mm 정도의 측정오차를 갖는다. 두 스테레오 영상의 시각

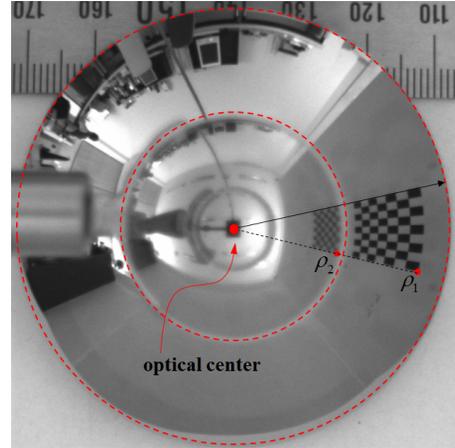


그림 6. 격자 패턴의 스테레오 영상.  
Fig. 6. Stereo image of grid pattern.

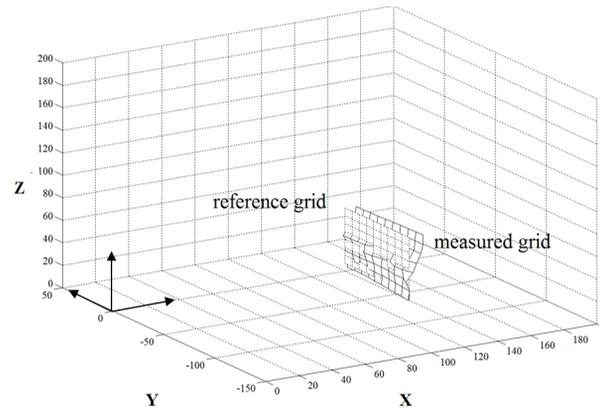


그림 7. 3차원 거리측정 결과.  
Fig. 7. Result of 3 dimensional distance measurement.

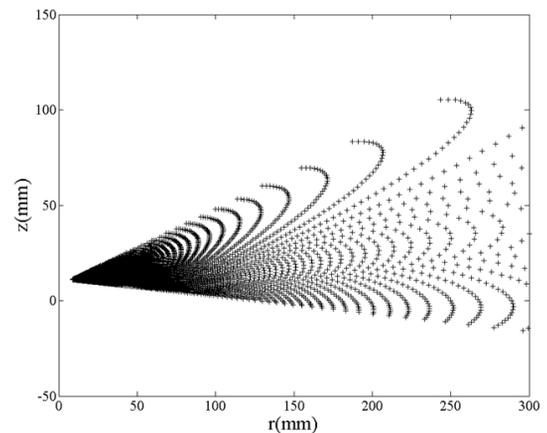


그림 8. 거리측정 정밀도.  
Fig. 8. Depth resolution.

편차(disparity)가 크지 않으므로 측정가능 거리가 크지 않고, 화소 측정오차에 따른 거리 오차도 큰 편이다. 본 영상 시스템의 거리측정 정밀도를 확인하기 위해 그림 8과 같이 거리 계산의 정밀도(depth resolution)를 구하였다. 거리 정밀도를 얻기 위해 필요한 매개 변수들은 앞서 최소제곱법에 의해 구한 값들을 사용하였다. 거리 계산 정밀도는 거리에 따른 계산

값의 신뢰성을 의미하는데, 그림에서 밀도가 높을수록 정밀도가 높게 된다. 그림에서 보는 바와 같이 본 시스템에 의한 거리계산이 대략 ~150 mm내에서  $r$  축 방향 거리 측정 오차가 5mm 이내임을 알 수 있다.

**V. 결론**

전방향 영상 시스템은 한 대의 카메라로 360도 전방향의 영상정보를 한번에 얻을 수 있기 때문에 근래 보안감시, 화상회의, 이동로봇등의 분야에서 많이 연구되고 있다. 특히 단일 카메라 전방향 스테레오 영상 시스템은 한 대의 카메라로 효과적으로 전방향의 3차원 정보를 획득할 수 있다는 장점이 있다. 본 논문에서는 곡면형 거울과 옴몰렌즈의 반사, 굴절 광학 특성을 이용한 단일 카메라 전방향 스테레오 영상시스템에서 3차원 거리측정을 위한 매개변수 추출 방법을 제시하였으며, 거리측정 성능을 실험을 통해 검증하였다. 한 대의 카메라를 이용하여 스테레오 영상을 얻는 방법은 경제적이고 대응점 정합이 쉽다는 장점이 있으나, 스테레오 영상간의 시각편차가 짧기 때문에 측정가능 거리가 길지 않고 화소 측정 오차에 따른 거리오차가 크다는 단점이 있다. 본 논문에서는 거리측정 정밀도 분석을 기반으로 적용가능한 거리 측정 범위를 제시하였다.

**REFERENCES**

[1] S. Baker and S. Nayar, "A theory of single-viewpoint catadioptric image formation," *Int'l Journ. of Computer Vision*, vol. 35, no. 2, pp. 175-196, 1999.

[2] T. Pajdla, T. Svobda, and V. Hlavac, "Epipolar geometry of central catadioptric camera," *Int'l Jour. of Computer Vision*, vol. 49, no. 1, pp. 23-37, 2002.

[3] J. Gluckman, S. Nayar, and K. Thorek, "Real-time omnidirectional and panoramic stereo," *Proc of DARPA Image Understanding Workshop '98*, vol. 1, pp. 299-303, 1998.

[4] S. Lin and R. Citris, "High resolution catadioptric omnidirectional stereo sensor for robot vision," *Proc. of ICRA*, 2003.

[5] D. Southwell, A. Basu, M. Fiala, and J. Reyda, "Panoramic Stereo," *Proc. of ICPR '96*, pp. 378-382, 1996.

[6] M. Fiala and A. Basu, "Panoramic stereo reconstruction using non-SVP optics," *Computer Vision and Image Understanding*, vol. 98, pp. 363-397, 2005.

[7] E. Cabral, J. Souza, and C. Hunoid, "Omnidirectional stereo vision with a hyperbolic double lobed mirror," *Proc. of Int'l Conf. on Pattern Recognition '04*, pp. 1-4, 2004.

[8] G. Jang, S. Kim, and I. Kweon, "Single camera catadioptric stereo system," *Proc. of Workshop on Omnidirectional Vision, Camera Networks and Non-Classical Cameras(OMNIVIS2005)*, 2005.

[9] L. He, C. Luo, F. Zhu, Y. Hao, J. Ou, and J. Zhou, "Depth map regeneration via improved graph cuts using a novel omnidirectional stereo sensor," *IEEE 11th International Conference on Computer Vision(ICCV)*, Oct. 2007.

[10] S. Yi and B. Choi, "Single camera omnidirectional stereo imaging system," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 15, no. 4, pp. 400-405, 2009.

[11] Camera Calibration Toolbox for Matlab, [http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib\\_doc/](http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/)

[12] W. Press, B. Flannery, S. Teukolsky, and W. Vetterling, *Numerical Recipes in C*, Cambridge University Press, 1988.



**이수영**

1988년 2월 연세대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1990년 2월 KAIST 전기및전자공학과 졸업(공학석사). 1994년 8월 KAIST 전기및전자공학과 졸업(공학박사). 1995년 3월~1999년 8월 KIST 시스템연구부 선임연구원. 1997년 2월~1998년 2월 Univ. of Southern California 박사후과정. 1999년 9월~2007년 2월 전북대학교 전자정보공학부 부교수. 2005년 6월~2006년 8월 Univ. of Illinois at Urbana-Champaign 방문교수. 2007년 3월~현재 서울과학기술대학교 전기정보공학과 교수. 관심분야는 보행로봇, 로봇비전, 이동로봇.



**김순철**

2007년 3월~현재 서울과학기술대학교 전기정보공학과 재학중. 관심분야는 로봇비전, 이동로봇.