

Catadioptric 전방향 스테레오 영상시스템 및 3차원 좌표 복원

김순철¹, 이수영^{*}

¹서울과학기술대학교 전기정보공학과

Catadioptric Omnidirectional Stereo Imaging System and Reconstruction of 3-dimensional Coordinates

Soon-Cheol Kim¹, Soo-Yeong Yi^{*}

¹Dept. of Electrical and Information Engineering, Seoul National University of Science and Technology

요약 광학 반사체를 이용하여 카메라 영상을 얻는 방법을 catadioptric 영상법이라고 부른다. Catadioptric 영상법은 360도 모든 방향의 시각정보를 한 장의 영상면에 담기 위한 전방향 영상 획득시스템에 많이 사용된다. 대표적인 전방향 광학 반사체로서 그릇 모양의 3차원 쌍곡면형 거울이 있다. 본 논문에서는 쌍곡면형 반사체를 이용한 catadioptric 전방향 영상 시스템에 간단히 오목 렌즈를 추가함으로써 하나의 카메라로 시점이 다른 전방향 스테레오 영상을 얻는 방법에 대해 연구하였다. 시점이 다른 전방향 스테레오 영상 정합을 통해 대상 물체의 3차원 좌표를 복원할 수 있다. 본 전방향 스테레오 영상 시스템은 한 대의 카메라를 사용하므로 경제적이며, 스테레오 영상간에 카메라 내재 매개변수가 같으므로 정합이 쉽다는 장점이 있다. 본 논문에서는 3차원 좌표값 측정에 필요한 매개변수들을 3 단계 캘리브레이션을 이용하여 추출하였고, 실험을 통해 전방향 3차원 거리측정 성능을 검증하였다. 또한 거리측정 정밀도를 분석하여 본 스테레오 영상 시스템의 신뢰할 만한 측정 범위를 제시하였다.

Abstract An image acquisition by using an optical mirror is called as a catadioptric method. The catadioptric imaging method is generally used for acquisition of 360-degree all directional visual information in an image. An exemplar omnidirectional optical mirror is the bowl-shaped hyperbolic mirror. In this paper, a single camera omnidirectional stereo imaging method is studied with an additional concave lens. It is possible to obtain 3 dimensional coordinates of environmental objects from the omnidirectional stereo image by matching the stereo image having different view points. The omnidirectional stereo imaging system in this paper is cost-effective and relatively easy for correspondence matching because of consistent camera intrinsic parameters in the stereo image. The parameters of the imaging system are extracted through 3-step calibration and the performance for 3-dimensional coordinates reconstruction is verified through experiments in this paper. Measurable range of the proposed imaging system is also presented by depth-resolution analysis.

Key Words : Calibration, Catadioptric, Omnidirectional stereo image, Reflection, Refraction

1. 서론

영상 시스템은 시야각(FOV: Field-Of-View)이 넓을 수록 한 장의 영상에 담을 수 있는 정보의 양이 많아진다. 넓은 시야각을 갖기 위한 여러 방법들 중 기존 카메라에 거울과 같은 광학소자를 조합하여 영상을 얻는 방

법을 catadioptric 방식이라 하는데, 360도 모든 방향의 시야각을 갖는 전방향 영상 시스템을 구성하는데 많이 사용된다[1].

서로 다른 시점(view point)을 갖는 두 장의 영상으로부터 삼각법을 이용하여 대상 물체의 3차원 좌표를 얻는 스테레오 영상 방식과 전술한 전방향 영상 방식을 결합

본 논문은 서울과학기술대학교 교내연구비의 지원으로 수행되었음

*Corresponding Author : Soo-Yeong Yi(Seoul National University of Science and Technology)

Tel: +82-2-970-6407 email: suylee@seoultech.ac.kr

Received December 15, 2014

Revised (1st May 12, 2015, 2nd May 14, 2015)

Accepted June 11, 2015

Published June 30, 2015

하여 360도 모든 방향 대상 물체의 3차원 좌표 정보를 얻을 수 있다. 전방향 스테레오 영상을 획득하기 위한 방법으로서 간단하게는 두 개의 전방향성 거울과 두 대의 카메라를 이용하는 방법이 있으며[2], 두 대의 카메라와 한 개의 전방향 거울, 그리고 추가적으로 빔 스플리터를 사용한 방법도 제안된 바 있다[3]. 두 대의 카메라와 전방향성 거울, 또는 빔 스플리터등의 광학소자를 조합하는 방법은 상대적으로 고비용이 들며 두 카메라 영상간에 렌즈의 초점거리, 조도와 같은 내재 매개변수 (intrinsic parameter)가 달라서 영상 정합이 어렵다는 문제점이 있다.

한편 두 대의 카메라가 아닌 한 대의 카메라와 광학 소자들을 조합하여 전방향 스테레오 영상을 획득하는 방법들이 제안되기도 하였다. 여기에는 한 대의 카메라와 부분적으로 곡률이 다른 하나의 전방향성 곡면 거울을 사용한 방법[4,5,6]이 있으며, 이와 유사하게 한 대의 카메라와 두 개의 전방향성 곡면 거울을 이용한 방법[7]이 있다. 또한 [8,9]에서는 한 대의 카메라와 하나의 전방향성 곡면 거울, 그리고 오목렌즈를 조합하는 방법이 제안되었다. 한 대의 카메라를 이용하여 전방향 스테레오 영상을 획득하는 방법은 상대적으로 저비용에 영상시스템을 구축할 수 있고 설치가 쉬우며, 스테레오 영상간의 카메라의 내재 변수가 같으므로 정합이 용이하다는 장점이 있다.

본 논문에서는 [8,9]와 같은 단일 카메라 전방향 스테레오 영상시스템에서 3차원 좌표 복원에 필요한 매개변수들을 캘리브레이션 과정을 통해 추출하고, 추출한 매개변수를 이용해 전방향의 물체에 대해 3차원 좌표 측정 성능을 검증하고자 한다. 참고문헌 [9]에서는 대상물체를 영상시스템의 한 방향에만 설치하였기 때문에 전방향의 거리측정 성능을 확인할 수는 없었으며, 또한 영상시스템의 측정가능 거리가 150mm 이내로서 가까운 영역에 국한되어 있었다. 본 논문에서는 영상시스템의 매개변수를 조정하여 보다 먼 영역에서도 거리 측정이 가능하도록 하였으며, 모든 방향의 거리측정이 가능함을 보이고자 한다.

매개변수 캘리브레이션에서는 카메라 내재변수와 전방향 스테레오 영상시스템 변수로 나누어 단계적으로 캘리브레이션함으로써 전체 시스템의 매개변수를 추출한다. 이렇게 추출된 시스템 매개변수들은 다시 360도 전방향의 대상물체 3차원 좌표 측정에 사용된다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서 단일 카메라 전방향 스테레오 영상시스템의 거리측정 원리에 대해서 간단히 설명하고, 3장에서 영상시스템의 매개변수 캘리브레이션 방법을 소개한다. 그리고 4장에서 실험을 통해 거리측정 성능을 검증한 후, 5장에서 결론을 맺는다.

2. Catadioptric 전방향 스테레오 영상 시스템

Catadioptric 전방향 스테레오 영상 시스템은 전방향성 거울의 반사특성과 볼록렌즈의 굴절 특성을 이용한 것이다. 전방향 거울로는 단일시점 조건을 만족하는 쌍곡면형(hyperbolic) 거울을 사용하였다. 그림 1에서 물체점 $P_o(r, z)$ 는 물체점의 3차원 좌표를 원통 좌표계로 나타낸 것이다. 방향각은 모든 방향에 동일하므로 별도로 표기하지 않았다.

경로 I과 경로 II는 모두 동일한 물체점 P_o 로부터 출발한 빛의 경로이다. 경로 I에서는 빛이 물체점에서 출발해 거울면위의 반사점인 $C_1(r_1, z_1)$ 에서 반사되어 카메라의 핀홀인 P_1 을 통과해 영상면에 상이 맺히게 된다. 경로 II에서는 거울면 위의 반사점 $C_2(r_2, z_2)$ 에서 반사된 빛이 오목거울을 통해 굴절되어 핀홀을 통과한 후 영상면에 상을 맺는다. 즉, 동일한 물체점에서 출발한 빛은 시각편차를 갖는 한 쌍의 스테레오 영상점을 만들게 된다. 두 영상점은 쌍곡면 거울에서 반사법칙과 오목렌즈에서 굴절법칙을 따른다. 기하광학 법칙과 삼각법을 통해 대응되는 영상점으로 부터 물체점 $P_o(r, z)$ 의 3차원 좌표를 계산 할 수 있다.

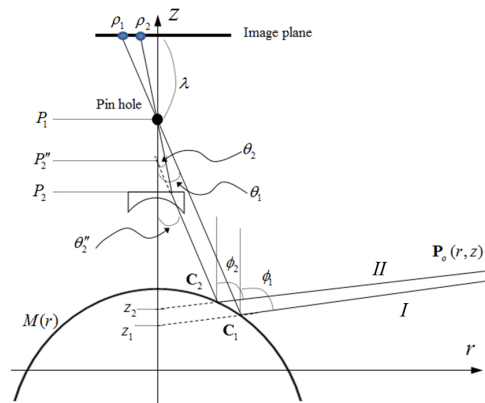


Fig. 1. Catadioptric single camera omnidirectional stereo imaging[8]

3차원 좌표 계산에 필요한 매개변수들은 다음과 같다.

- 카메라 렌즈의 초점거리: λ
- 카메라 핀홀의 높이: P_1
- 오목렌즈의 높이: P_2
- 오목렌즈의 초점거리: f

그림 1에서 쌍곡면의 함수는 다음과 같이 표현된다. 여기서 쌍곡선면 함수의 매개변수 a, b, d 는 거울제조사로부터 제공된다.

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

영상면에서 두 대응 영상점의 측정값은 광축으로부터 영상점까지의 거리, (ρ_1, ρ_2) 로 나타난다. 측정값 ρ_1 과 ρ_2 와 카메라 렌즈의 초점거리 λ 로부터 그림 1에서의 θ_1 과 θ_2 는 다음과 같이 구할 수 있다.

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

$$\theta_2 = \tan^{-1}\left(\frac{\rho_2}{\lambda}\right)$$

경로 II에서는 오목렌즈에서의 굴절로 인해 다음과 같은 식이 성립한다.

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

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

물체점의 좌표값 $P_o(r, z)$ 는 연립방정식 (5-1)과 (5-2)로부터 식 (6)으로 구해진다.

$$\text{- 경로 I: } z = \cot\phi_1 r + z_1 \quad (5-1)$$

$$\text{- 경로 II: } z = \cot\phi_2 r + z_2 \quad (5-2)$$

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

위 식에서 각 중간 변수들은 식 (1)~(4)로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\phi_1 = \theta_1 + 2 \tan^{-1}\left(-\frac{a}{b} \frac{r_{c1}}{\sqrt{r_{c1}^2 + b^2}}\right), \quad (7)$$

$$z_1 = z_{c1} - \cot\phi_1 r_{c1},$$

$$\phi_2 = \theta_2'' + 2 \tan^{-1}\left(-\frac{a}{b} \frac{r_{c2}}{\sqrt{r_{c2}^2 + b^2}}\right),$$

$$z_2 = z_{c2} - \cot\phi_2 r_{c2},$$

$$r_{c1} = \frac{b^2 \cot\theta_1 (P_1 - d) + ab \sqrt{(P_1 - d)^2 + b^2 \cot^2\theta_1 - a^2}}{b^2 \cot^2\theta_1 - a^2},$$

$$r_{c2} = \frac{b^2 \cot\theta_2'' (P_2'' - d) + ab \sqrt{(P_2'' - d)^2 + b^2 \cot^2\theta_2'' - a^2}}{b^2 \cot^2\theta_2'' - a^2},$$

$$z_{c1} = -\cot\theta_1 r_{c1} + P_1,$$

$$z_{c2} = -\cot\theta_2'' r_{c2} + P_2''$$

식 (6)의 좌표값은 모든 방향에 대해 적용할 수 있으므로 물체점의 3차원 좌표값이 된다.

3. 캘리브레이션

대상물체의 3차원 좌표값을 구하기 위해서는 계산에 필요한 매개변수들을 구하는 것이 선행되어야 한다. 영상시스템에서 매개변수 캘리브레이션은 미리 크기와 모양을 알고 있는 패턴을 관측한 패턴과 비교하여 매개변수를 역산하는 방법으로 수행된다. 본 논문의 전방향 스테레오 영상시스템의 매개변수 캘리브레이션은 카메라 내재변수와 영상시스템 변수들로 나누어 3 단계로 진행된다.

■ 1 단계: 이 단계에서는 카메라의 렌즈에 의해 발생하는 방사왜곡과 접선왜곡을 보정한다. 이 과정을 통해 카메라 자체는 이상적인 핀홀 카메라 모델로 생각할 수 있다. 2 단계에서 기술한 거리계산식은 카메라를 이상적인 핀홀 모델로 가정하고 있으므로 1 단계의 카메라 내재변수 캘리브레이션 과정은 반드시 선행되어야 한다. 본 논문에서는 잘 알려진 매트랩 캘리브레이션 툴박스[10]를 사용하여 캘리브레이션 작업을 수행하였다. 이 과정에서 렌즈의 초점거리 λ 를 구할 수 있다. 그림 2는 렌즈 왜곡을 보정한 결과이다.

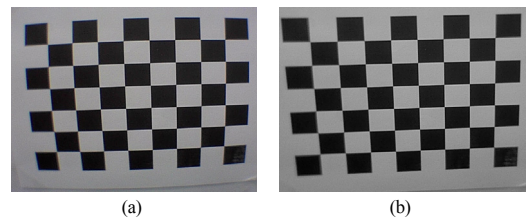


Fig. 2. Camera calibration
(a) Before calibration (b) After calibration

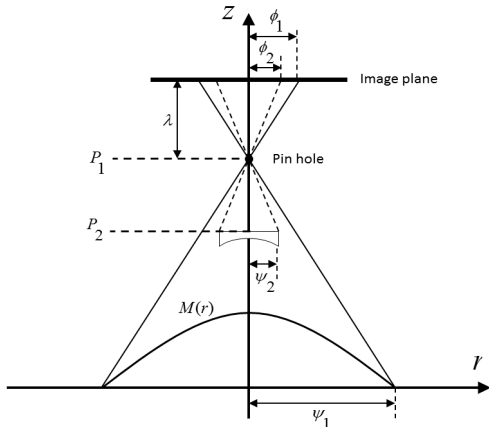


Fig. 3. System parameters P_1 and P_2 [9]

■ 2 단계: 그림 3에서 보이는 바와 같이 편홀의 높이 P_1 과 오목렌즈의 설치 높이 P_2 는 미리 알고 있는 쌍곡면형 거울과 오목렌즈의 크기가 영상에서 나타나는 크기를 비교하여 간단한 비례식을 통해 구할 수 있다. 1 단계 카메라 자체 캘리브레이션 과정에서 구한 렌즈 초점거리 λ 와 P_1 과 P_2 사이에는 식 (8)과 같은 관계가 성립한다.

$$\begin{aligned} \phi_1 : \lambda &= \psi_1 : P_1 \\ \phi_2 : \lambda &= \psi_2 : P_1 - P_2 \end{aligned} \quad (8)$$

여기서 ψ_1 과 ψ_2 는 각각 전방향 거울과 오목렌즈의 반지름을 의미하며, ϕ_1 과 ϕ_2 는 영상면에서 광축(optical axis)과 해당 화소까지의 길이를 나타낸다. 식 (8)로부터 시스템 변수 P_1 및 P_2 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$P_1 = \frac{\lambda \psi_1}{\phi_1}, \quad P_2 = \frac{\lambda \psi_1}{\phi_1} - \frac{\lambda \psi_2}{\phi_2} \quad (9)$$

표 1은 제조사에서 제공되는 쌍곡면형 거울의 매개변수이다.

Table 1. Parameters of hyperbolic mirror[11]

Parameters	a	b	d	ψ_1
Value(mm)	28.095	23.4125	45.6654	30.0

■ 3 단계: 일반적으로 오목렌즈와 카메라 렌즈의 초점거리는 오차가 크므로 이를 기반으로 추출한 매개변수 P_1 및 P_2 역시 큰 오차를 갖는다. 따라서 앞서 구한 매

개변수의 값들을 통합적으로 보정하기 위해 기준 격자 패턴과 관측한 영상을 비교하는 최소제곱오차 과정을 적용하였다. 식 (6)의 거리계산식은 식 (10)과 같이 나타낼 수 있다. 격자 패턴 각 꼭지점들의 좌표를 원점을 기준으로 원통 좌표계 (r_{ref}, z_{ref}) 로 변환하고 식 (11)과 같이 제곱오차를 정의한다.

$$r = f_r(\rho_1, \rho_2, P_1, P_2, \lambda, f), \quad (10)$$

$$z = f_z(\rho_1, \rho_2, P_1, P_2, \lambda, f)$$

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

식 (11)에서 위첨자 (i, j) 는 격자 패턴의 각 꼭지점을 나타낸다. 이제 각 매개변수들에 대해서 식 (12)와 같은 그래디언트(gradient)를 정의하여 제곱오차가 최소가 되는 값을 반복탐색을 통해서 추출 할 수 있다.

$$a_{k+1} = a_k + \Delta_a \left. \frac{\partial E}{\partial a} \right|_k, \quad k = 1, 2, 3 \dots \quad (12)$$

식 (12)에서 a 는 영상시스템의 매개변수 λ, P_1, P_2, f 를 나타내며, Δ_a 는 탐색 스텝의 크기를 의미한다. 거리 계산식 (6)이 매우 복잡하기 때문에 그래디언트를 해석적인 방법으로 구하기는 매우 어렵다. 이 때문에 그래디언트를 다음 식 (13)과 같이 근사하였고, 이를 사용해 매개변수를 추출하였다.

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

표 2는 그래디언트 탐색과정에서 사용한 초기값과 각각의 수렴값을 나타낸 것이다. 초기값은 1단계 및 2단계에서 구한 값이다.

Table 2. Initial value and convergent value of parameters from gradient search

Parameters	Initial value(mm)	Convergence value(mm)
λ	2581.0	2550.99
P_1	166.66	157.67
P_2	31.42	38.82
f	50.0	66.36

4. 실험 결과

다음 그림은 본 논문에서 전방향 거리측정 성능을 검증하기 위해 사용한 단일 카메라 전방향 스테레오 영상장치이다.

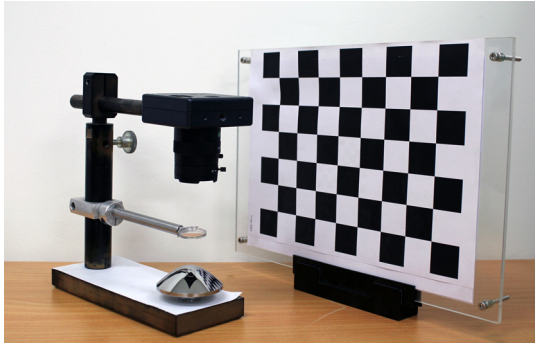


Fig. 4. Catadioptric single camera omnidirectional stereo vision system

모든 방향에서의 거리측정을 위해 그림 5와 같이 전방향 스테레오 영상장치 주위에 격자 패턴을 설치하였다. 이 때, 각각의 격자패턴은 영상장치로부터의 거리가 각각 다르며 격자의 크기 또한 다르다.

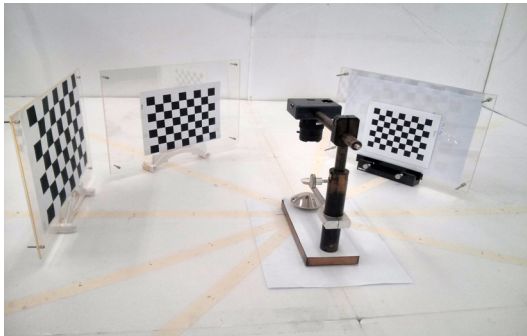
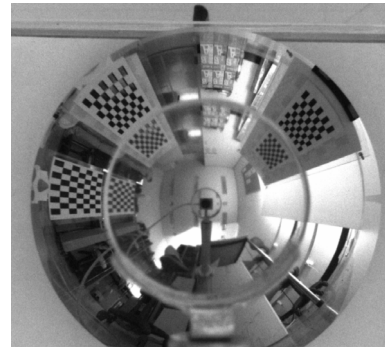


Fig. 5. Experimental setup

그림 6은 그림 5의 상황에서 얻은 격자 패턴의 스테레오 영상과 이를 펼친 파노라마 영상이다. 본 논문에서는 그림 6 (a)의 전방향 원영상을 그림 6 (b)와 같은 파노라마 영상으로 펼치는 것이 목적은 아니지만, 참고를 위하여 제시한다.



(a)



(b)

Fig. 6. Experimental image

(a) Omnidirectional image (b) Panorama image

그림 6 (a)의 전방향 영상에서 한 물체점에 대한 한 쌍의 대응점은 같은 반지름 직선상에 위치한다. 그림 6 (b) 파노라마 영상에서는 한 물체점에 대한 한 쌍의 영상 대응점은 같은 수직선 상에 위치하게 된다. 그림 7은 그림 6에서 측정된 격자의 각 교점 위치정보와 식 (6)을 이용하여 복원한 3차원 거리 측정 결과이다. 계산을 통해 좌표값 (r, z) 와 기준 격자를 직교좌표계로 변환하여 그린 것이다.

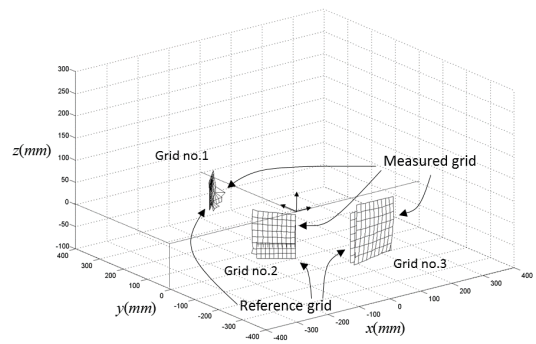


Fig. 7. Result of 3-dimensional distance measurement

다음 표 3는 그림 7의 3차원 거리측정 결과의 측정거리, 격자 패턴의 크기, 측정오차를 정리한 것이다.

Table 3. Result of 3-dimensional distance measurement

Value	Grid no.1	Grid no.2	Grid no.2
Measurement distance	220mm	280mm	350mm
Size of grid pattern	8mm, 10×8	11mm, 10×8	16mm, 10×8
Measurement error	~20mm	~20mm	~30mm

그림 7과 표 3에서 볼 수 있듯이 측정거리 220mm, 280mm, 350mm에서 각각 약 ~20mm, ~20mm, ~30mm 정도의 측정오차를 갖는다. 두 스테레오 영상의 시각편차가 크지 않기 때문에 측정 가능거리가 크지 않고 측정 오차도 큰 편이다. 또한, 화소 위치가 이산화 되어 있는 영상 센서의 특성에 의해 발생하는 화소 측정 오차에 따른 거리 오차도 크게 나타날 수 있다. 그림 8은 앞서 최소제곱법에 의해 구한 매개변수들을 이용하여 거리 계산 정밀도(depth resolution)를 구한 것이다. 거리계산 정밀도는 거리에 따른 측정값의 신뢰성을 의미하는데, 그림에서 밀도가 높을수록 정밀도가 높다. 그림에서 보는 바와 같이 ~250mm 내에서 본 시스템의 r 축 방향 거리 측정 오차가 25mm 이내임을 알 수 있다. 한 대의 카메라를 사용하여 전방향 스테레오 영상을 얻는 방법은 하나의 영상 센서를 분할하여 스테레오 영상을 담아야 하므로 상대적으로 영상의 해상도가 떨어지며 스테레오 영상간의 시각편차(disparity)가 크지 않아 측정 정밀도가 낮은 편이다.

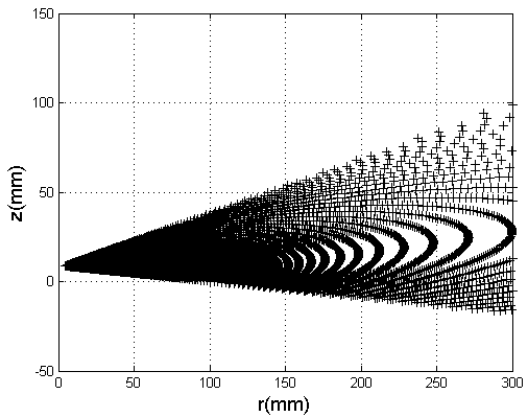


Fig. 8. Depth resolution

5. 결론

전방향 영상 시스템은 360도의 넓은 시야각을 갖기 때문에 한 장의 영상에 많은 영상정보를 담을 수 있어

근래에 많이 연구되고 있는 분야이다. 특히 전방향성 거울과 오목렌즈를 이용하여 한 대의 카메라로부터 전방향 스테레오 영상을 획득하기 위한 단일 카메라 전방향 스테레오 영상시스템은 경제적이고 효과적으로 전방향의 3차원 정보를 획득할 수 있다는 장점이 있다. 본 논문에서는 단일 카메라 전방향 스테레오 시스템의 영상획득 원리 및 시스템 매개변수 추출방법에 대해서 간단히 살펴보고, 전방향 3차원 좌표측정 성능을 검증하였다. 본 논문에서 전방향 스테레오 영상을 얻는 방법은 경제적이며 한 쌍의 대응점이 같은 반지름 직선 위에 있어 정합이 쉽다는 장점이 있으나, 스테레오 영상간의 시각편차가 크지 않아 화소 측정 오차에 따른 거리 측정오차가 크다는 단점이 있다. 본 논문에서는 최소제곱법을 통해 거리계산에 필요한 매개변수를 추출하고 이를 통해 거리 측정 정밀도를 분석하고 신뢰할만한 거리측정 범위를 제시하였다. 또한 매개변수 최적화를 통해 측정성능의 향상이 가능함을 보였다.

References

- [1] S Baker and S. Nayer, "A theory of single-view point catadioptric image formation," *Int'l Journal of Computer Vision*, vol. 35, no. 2, pp. 175-196, 1999.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1023/A:1008128724364>
- [2] P. Doubek and T. Svoboda, "Realable 3D reconstruction from a few catadioptric images," *Proc. of Third Workshop on Omnidirectional Vision, OMNVIS2002*, pp. 71-78, 2002.
- [3] S. Lin and R. Citris, "High resolution catadioptric omnidirectional stereo sensor for robot vision," *Proc. of ICRA*, 2003.
- [4] 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.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/icpr.2004.1333989>
- [5] D. Southwell, A. Basu, M. Fiala, and J. Reyda, "Panoramic Stereo," *Proc. of ICPR '96*, pp. 378-382, 1996.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/icpr.1996.546053>
- [6] M. Fiala and A. Basu, "Feature extraction and calibration for sterero reconstruction using non-SVP optics in a panoramic stereo-vision sensor," *Proc. of Third Workshop on Omnidirectional Vision, OMNVIS2002*,

pp.79-86, 2002.

- [7] 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.
- [8] 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.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5302/J.ICROS.2009.15.4.400>
- [9] S. Yi and S. Kim, "Depth measurement using an omnidirectional stereo vision system with a single camera," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems* (in Korean), vol. 19, no. 11, pp. 955-959, 2013.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5302/J.ICROS.2013.13.9028>
- [10] Camera Calibration Toolbox for Matlab, http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/, (accessed Dec., 10, 2014)
- [11] <http://www.neovision.cz/prods/panoramic/h3s.html>, (accessed Dec., 10, 2014)

이 수 영(Soo-Yeong Yi)

[정회원]



- 1988년 2월 : 연세대학교 전자공학과 (공학사)
- 1990년 2월 KAIST 전기및전자공학과 (공학석사)
- 1994년 8월 : KAIST 전기및전자공학과 (공학박사)
- 1995년 3월 ~ 1999년 8월 : KIST 시스템연구부 선임연구원
- 1999년 9월 ~ 2007년 2월 : 전북대학교 전자정보공학부 교수
- 2007년 3월 ~ 현재 : 서울과학기술대학교 전기정보공학과 교수

<관심분야>

보행로봇, 로봇비전, 이동로봇

김 순 철(Soon-Cheol Kim)

[준회원]



- 2014년 2월 : 서울과학기술대학교 전기정보공학과 (공학사)
- 2014년 3월 ~ 현재 : 서울과학기술대학교 전기정보공학과 대학원 석사과정 재학중

<관심분야>

로봇비전, 이동로봇