

# 단일 카메라 전방향 스테레오 영상 시스템

## Single Camera Omnidirectional Stereo Imaging System

이 수 영\*, 최 병 옥  
(Sooyeong Yi and Byungwook Choi)

**Abstract :** A new method for the catadioptric omnidirectional stereo vision with single camera is presented in this paper. The proposed method uses a concave lens with a convex mirror. Since the optical part of the proposed method is simple and commercially available, the resultant omnidirectional stereo system becomes versatile and cost-effective. The closed-form solution for 3D distance computation is presented based on the simple optics including the reflection and the refraction of the convex mirror and the concave lens. The compactness of the system and the simplicity of the image processing make the omnidirectional stereo system appropriate for real-time applications such as autonomous navigation of a mobile robot or the object manipulation. In order to verify the feasibility of the proposed method, an experimental prototype is implemented.

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

### I. 서론

전방향(omnidirectional) 영상 시스템은 기존의 영상 시스템에 비해 넓은 시야각을 가지고 있기 때문에 근래들어 컴퓨터 비전, 이동로봇 등의 연구 분야와 더불어, 감시, 다자 회의와 같은 실용 분야에 이르기까지 그 응용의 폭을 점점 넓혀가고 있다. 전방향 영상을 얻기 위한 일반적인 방법은 볼록 거울과 카메라를 이용하는 것(catadioptric)으로, 이는 카메라의 영상축을 볼록 거울의 중심축과 일치시켜서 360도 모든 방향의 영상을 한 번에 얻을 수 있는 방법이다[4]. 볼록 거울을 이용하여 전방향 영상을 얻는 방법은 여러 대의 카메라를 통해, 혹은 단일 카메라를 회전시키면서 얻은 여러 장의 영상을 모자이크 합성함으로써 파노라마 영상을 얻는 방법에 비해 영상의 공간적 해상도가 상대적으로 낮은 반면에 영상 획득 시스템이 매우 간단하고, 획득 속도가 빠르다는 장점이 있다. 전방향 영상 획득에 사용되는 볼록 거울은 보통 원뿔형, 구형, 2차 곡면형, 혹은 쌍곡면형의 거울들로서 여러 제조회사에서 연구용으로 많이 개발, 판매되고 있다[1,4].

한편 카메라 영상으로부터 3차원 거리 정보를 얻기 위해서는 동일 물체점에 대해서 시점이 다른 두 영상, 즉 스테레오 영상이 필요하다. 스테레오 영상을 획득하기 위한 한 가지 자명한 방법은 시야각 차이를 갖는 두 대의 카메라를 이용하는 것이다. 그러나 두 대의 카메라를 이용하는 것은 장비가 복잡하고 비용이 많이 든다는 문제점뿐만 아니라, 초점거리 오차, 조도 차이와 같은 카메라 내재 매개변수(intrinsic parameters)에 있어서의 차이 때문에 동일점 대응을 위한 영상 처리가 어려워진다는 문제점이 있다. 따라서 한 대의 카메라를 이용하여 스테레오 영상을 얻는 단일 카메라 스테레오 영상법이 근래 많이 연구되고 있다. 단일 카메라를 이용하여 스테레오 영상을 얻는 가장 기본적인 방

법은 카메라를 공간적으로 이동시켜서 영상을 얻는 것이다. 이러한 방법은 계속적으로 움직이는 이동로봇에 장착된 카메라로부터 시간에 따라 연속적으로 영상을 얻고, 이를 처리하여 이동로봇과 물체사이의 거리 정보를 얻어내는 방법에 응용되었다[2]. 그러나 이 방법은 이동하는 카메라의 공간 위치 변동을 정확하게 알 수 없기 때문에, 두 장의 영상으로부터 계산한 물체까지의 거리 값이 정밀하지 않으며, 이동 소요시간 때문에 실시간 적용이 어렵다는 문제점이 있다. 카메라 위치 변동에 따르는 문제점을 극복하기 위하여 방향각을 다르게 설치한 두 개의 평면 거울과 단일 카메라를 이용하여 서로 다른 시야각을 갖는 스테레오 영상을 얻는 방법이 제안되었으며[6], 하나의 물체점에 대해서 두 개의 가상점(virtual point) 생성하는 바이프리즘의 원리를 이용하여 단일 카메라로 스테레오 영상을 얻는 방법이 연구되기도 하였다[8].

시각 편차(disparity)가 있는 두 영상으로부터 물체까지의 거리를 구하는 스테레오 방법은 전방향 영상 시스템에도 적용될 수 있다. 쉽게 생각할 수 있는 전방향 스테레오 영상 시스템은 기존의 스테레오 영상법과 같이 두 개의 볼록 거울과 두 대의 카메라를 이용하는 것이다[5,7]. 전방향 스테레오 영상 방법은 모든 방향의 거리 정보를 한번에 빠르게 얻을 수 있으므로, 이동로봇의 자율 주행을 위한 센서 시스템으로 특히 유용하다. K. Koyasu 등은 두 대의 전방향 스테레오 영상 시스템을 통하여 물체를 인식하고 이동로봇의 자율주행에 이용하는 방법을 제안하였다[3].

한편 기존의 스테레오 영상법에서와 같이 전방향 스테레오 영상법에 있어서도 단일 카메라를 이용하는 방법이 연구되었다. D. Southwell 등은 이중 곡면을 갖는 하나의 전방향 거울과 단일 카메라를 통하여 전방향 스테레오 영상을 얻는 방법을 제안하였으며[10], 이와 유사하게 E. Cabral 등도 이중 쌍곡면 거울을 설계하고, 이를 통해 전방향 스테레오 영상을 얻었다[12]. 또한 최근 G. Jang 등은 상하방향의 거리간격을 갖는 두 쌍곡면 거울을 설계하여 스테레오 영상의 시각편차를 확대함으로써 3차원 거리 계산의 정확성

\* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2008. 12. 5., 채택확정 : 2009. 1. 30.

이수영, 최병옥 : 서울산업대학교 전기공학과

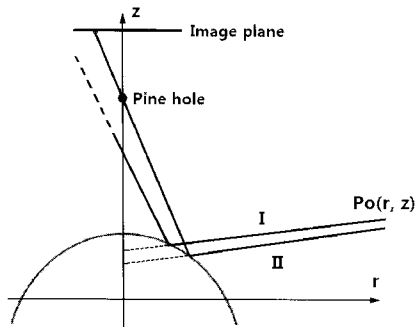
(suylee@snut.ac.kr/bwchoi@snut.ac.kr)

을 높이는 방법을 제안하기도 하였다[13]. 이러한 단일 카메라 전방향 스테레오 영상법은 시스템의 단순화에 따라 구축 비용을 줄일 수 있을 뿐만 아니라, 카메라 내재 매개 변수에 따르는 스테레오 영상의 일관성을 유지함으로써 영상처리를 쉽게 할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 이중 곡면을 갖는 거울은 상용화되어 있지 않으며 설계, 제작이 어렵고, 또한 전용 제작에 따른 비용도 많이 소요된다는 문제점이 있다.

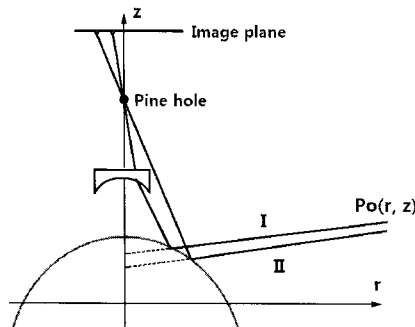
본 논문에서는 단일 카메라를 이용하여 전방향 스테레오 영상을 획득하고 3차원 거리를 계산하기 위한 새로운 방법을 제안하고자 한다. 제안하는 방법은 볼록 거울에 의한 빛의 반사특성과 오목 렌즈에 의한 굴절특성을 이용하는 것이다. 본 방법은 이미 상용화되어 있는 볼록 거울과 오목 렌즈를 이용하므로 전방향 스테레오 영상 시스템이 매우 경제적이고 효과적이라는 장점이 있다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. II 장에서 본 논문에서 제안하고자 하는 볼록 거울과 오목 렌즈를 이용한 단일 카메라 전방향 스테레오 영상 시스템의 광학원리에 대해 소개하고, III 장과 IV 장에서 본 시스템을 통해 획득한 전방향 스테레오 영상으로부터 3차원 거리를 계산하기 위한 광학식을 유도하고, 간단한 실험 예를 제시하며, V 장에서 결론과 추후 과제를 제시한다.

**II. 단일 카메라 전방향 스테레오 영상 시스템**

본 논문에서 제안하는 전방향 스테레오 영상 시스템은 전방향성 볼록 거울과 오목 렌즈의 광학적 특성을 이용하는 것이다. 전방향성 거울로는 일반적으로 많이 사용되는 쌍곡



(a) Omni-directional imaging system



(b) Omni-directional stereo imaging system using concave lens

그림 1. 제안하는 전방향 스테레오 영상 시스템.

Fig. 1. The proposed single camera omnidirectional stereo imaging system.

면형을 가정한다. 그림 1에서 본 시스템의 원리에 대해서 설명한다. 그림 1(a)에서 물체에서 시작된 경로 I 방향의 빛은 전방향 볼록 거울면에 반사되어 카메라의 핀홀을 지나고 센서면에 영상점을 맺게 된다. 경로 I 방향 이외의 모든 빛(예: 경로 II)은 거울에서 반사된 후, 핀홀에 이르지 못하므로 센서면에 영상을 맺히지 못한다. 거울에서 반사되는 빛은 물론 거울면의 법선에 대해서 입사각과 반사각이 같다는 반사 법칙을 따른다.

이제 그림 1(b)와 같이 볼록거울과 오목렌즈를 조합하는 경우를 생각하자. 경로 I의 빛은 오목렌즈의 영향을 받지 않으므로 앞에서와 같이 영상을 맺는다. 그러나 경로 II의 빛은 오목렌즈를 통과하면서 굴절되어 핀홀을 향하게 되고, 따라서 센서면에 영상을 맺게 된다. 경로 I과 경로 II의 빛은 동일 물체점에서 나온 것이므로 센서면에 맺히는 영상은 결과적으로 시각 편차를 갖는 스테레오 영상을 형성하게 된다. 센서면에서 두 영상점은 볼록거울의 반사법칙과 오목렌즈를 통한 굴절법칙을 따르므로, 광학식을 통해 물체까지의 3차원 거리를 계산할 수 있다.

**III. 거리계산을 위한 굴절 및 반사 광학**

**1. 오목렌즈 굴절광학식**

그림 2는 오목렌즈를 지날 때, 빛의 굴절 현상을 설명한다. 굴절지수가 다른 두 매질의 경계면에서 빛의 굴절은 기본적으로 잘 알려진 스넬의 법칙을 따른다.

오목렌즈 공식에 의해 각 매개변수 사이에 대한 다음 관계식을 얻을 수 있다:

$$\frac{1}{P_1 - P_2} - \frac{1}{P_2'' - P_2} = -\frac{1}{f} \equiv P_2'' = \frac{f \cdot (P_1 - P_2)}{f + P_1 - P_2} + P_2 \quad (1)$$

여기서  $f$ 는 오목렌즈의 초점거리를 나타낸다. 위 그림에서  $l$ 과  $\theta_2''$ 를 다음과 같이 구할 수 있다:

$$l = (P_1 - P_2) \tan \theta_2 \quad (2a)$$

$$\tan \theta_2'' = \frac{l}{P_2'' - P_2} \quad (2b)$$

그러므로 식 (2b)에 식 (1)과 (2a)을 대입하면 다음이 된다:

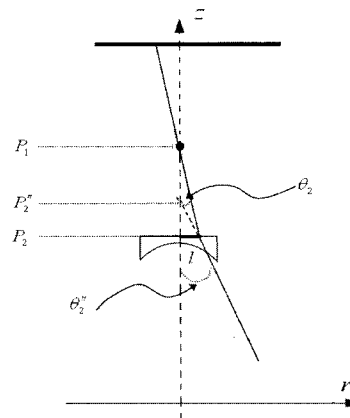


그림 2. 오목렌즈에 의한 굴절.

Fig. 2. Refraction through concave lens.

$$\theta_2'' = \tan^{-1} \left\{ \frac{f + P_1 - P_2}{f} \cdot \tan \theta_2 \right\} \quad (3)$$

여기서는 일반적으로 많이 사용되는 얇은 렌즈 조건과 근축 광선에 대한 1차 근사 해석을 적용한 것이다.

2. 쌍곡면형 거울 반사광학식

편의를 위하여 3차원 곡면을  $r-z$  평면에 투영된 2차원 곡선으로 서술한다. 다음의 해석은  $z$  축을 기준으로 회전함으로써 쉽게 3차원으로 확장될 수 있다. 쌍곡면형 거울이 기준점  $O$ 로부터  $d$ 의 높이에 놓여 있다고 가정하자. 이 경우  $r-z$  평면에서 쌍곡선 함수식은 다음과 같이 표현된다:

$$\begin{aligned} \frac{(z-d)^2}{a^2} - \frac{r^2}{b^2} &= 1 \\ \equiv z &= M(r) = d - \frac{a}{b} \sqrt{r^2 + b^2} \end{aligned} \quad (4)$$

여기서  $a$ 와  $b$ 는 쌍곡선의 매개변수이다.

이제 그림 3과 같이 물체점  $P_o(r, z)$ 에서 방사된 빛 중에서 거울면에서 반사되어 오목렌즈를 거치지 않고 핀홀을 통과하는 빛의 경로를 구성하는 경로 I과 경로 I'의 방정식은 다음과 같이 표현할 수 있다:

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

$$\text{경로 I': } z = -\cot \theta_1 r + P_1 \quad (5b)$$

또한 경로 I'과 거울 쌍곡선과의 교점,  $C_1 = (r_{c1}, z_{c1})$ 은 다음과 같이 구할 수 있다:

$$\begin{aligned} z_{c1} &= -\cot \theta_1 r_{c1} + P_1 = d - \frac{a}{b} \sqrt{r_{c1}^2 + b^2} \\ \equiv r_{c1} &= \frac{b^2 \cot \theta_1 (P_1 - d) \pm ab \sqrt{(P_1 - d)^2 + b^2 \cot^2 \theta_1 - a^2}}{b^2 \cot^2 \theta_1 - a^2}, \\ z_{c1} &= -\cot \theta_1 r_{c1} + P_1 \end{aligned} \quad (6)$$

그리고 교점에서 반사법칙(입사각=반사각)에 의해 다음 조건식을 구할 수 있다:

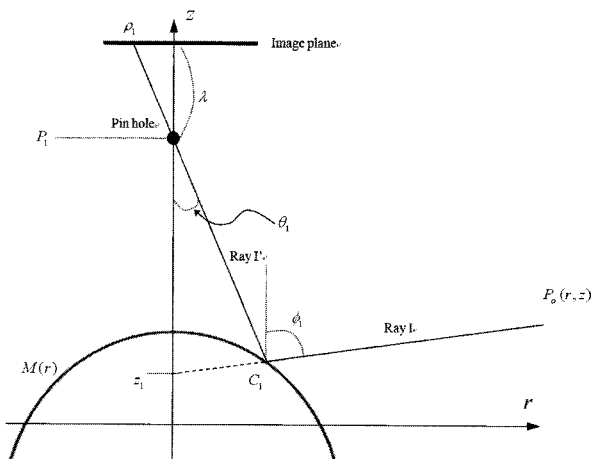


그림 3. 쌍곡면형 거울에 의한 반사.  
Fig. 3. Reflection on hyperbolic mirror.

$$\begin{aligned} \phi_1 &= \theta_1 + 2 \tan^{-1} \left( \frac{\partial M(r)}{\partial r} \Big|_{C_1} \right) \\ &= \theta_1 + 2 \tan^{-1} \left( -\frac{a}{b} \cdot \frac{r_{c1}}{\sqrt{r_{c1}^2 + b^2}} \right) \end{aligned} \quad (7)$$

여기서  $\frac{\partial M(r)}{\partial r} \Big|_{C_1} = -\frac{a}{b} \cdot \frac{r_{c1}}{\sqrt{r_{c1}^2 + b^2}}$  이고,  $r_{c1}$ 은 앞에서 구한 값이다. 또 경로 I이  $C_1$ 을 지나야 하므로,

$$z_{c1} = \cot \phi_1 r_{c1} + z_1 \equiv z_1 = z_{c1} - \cot \phi_1 r_{c1} \quad (8)$$

이 된다. 정리하면 경로 I의 방정식은 다음과 같이 된다:

$$z = \cot \phi_1 r + z_1 \quad (9)$$

여기서 각 변수들은 다음 식으로 구할 수 있다:

$$\begin{aligned} \phi_1 &= \theta_1 + 2 \tan^{-1} \left( -\frac{a}{b} \cdot \frac{r_{c1}}{\sqrt{r_{c1}^2 + b^2}} \right), \\ z_1 &= z_{c1} - \cot \phi_1 r_{c1} \\ r_{c1} &= \frac{b^2 \cot \theta_1 (P_1 - d) \pm ab \sqrt{(P_1 - d)^2 + b^2 \cot^2 \theta_1 - a^2}}{b^2 \cot^2 \theta_1 - a^2}, \\ z_{c1} &= -\cot \theta_1 r_{c1} + P_1 \end{aligned}$$

위 식에서  $P_1$ 은 카메라 핀홀의 위치를 나타내고, 매개변수  $a$ ,  $b$ 와  $d$ 는 쌍곡면형 거울의 사양으로 주어진다. 측정값,  $\theta_1$ 은 영상으로부터 다음과 같이 얻을 수 있다:

$$\theta_1 = \tan^{-1} \left( \frac{\rho_1}{\lambda} \right) \quad (10)$$

여기서  $\lambda$ 는 카메라의 초점거리,  $\rho_1$ 은 영상점의 광축으로부터의 거리를 나타낸다.

3. 3차원 거리계산식

아래 그림에서 오목렌즈를 통과하는 빛의 경로를 구성하는 경로 II, 경로 II'의 방정식은 다음과 같이 표현된다:

$$\text{경로 II: } z = \cot \phi_2 r + z_2 \quad (11a)$$

$$\text{경로 II': } z = -\cot \theta_2'' r + P_2'' \quad (11b)$$

앞에서와 유사한 방법으로 경로 II'과 쌍곡선과의 교점을 구하고, 교점에서 반사법칙을 적용함으로써 경로 II의 방정식을 다음과 같이 구할 수 있다:

$$z = \cot \phi_2 r + z_2 \quad (12)$$

여기서 각 변수들은 다음과 같이 구할 수 있다:

$$\begin{aligned} \phi_2 &= \theta_2'' + 2 \tan^{-1} \left( -\frac{a}{b} \cdot \frac{r_{c2}}{\sqrt{r_{c2}^2 + b^2}} \right), \\ z_2 &= z_{c2} - \cot \phi_2 r_{c2} \\ r_{c2} &= \frac{b^2 \cot \theta_2'' (P_2'' - d) \pm ab \sqrt{(P_2'' - d)^2 + b^2 \cot^2 \theta_2'' - a^2}}{b^2 \cot^2 \theta_2'' - a^2}, \\ z_{c2} &= -\cot \theta_2'' r_{c2} + P_2'' \end{aligned}$$

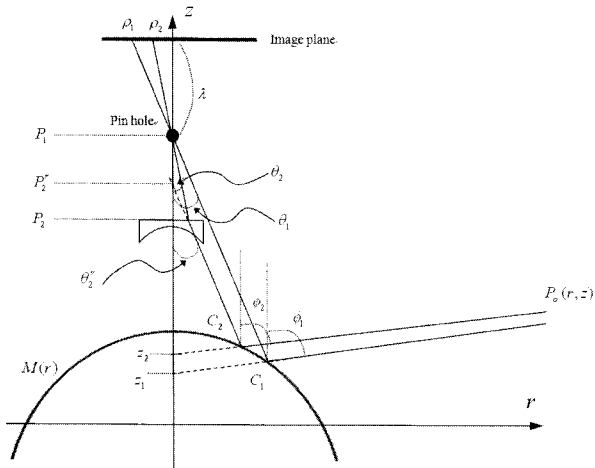


그림 4. 스테레오 영상에 의한 거리계산.

Fig. 4. Distance computation given stereo image pair.

이다. 여기서  $P_2''$  과  $\theta_2''$  은 오목렌즈를 통한 굴절식 (1)과 (2)로부터 구할 수 있다. 측정값,  $\theta_2$  는 물론 영상으로부터 다음과 같이 얻을 수 있다:

$$\theta_2 = \tan^{-1}\left(\frac{\rho_2}{\lambda}\right) \quad (13)$$

결과적으로 물체점,  $P_0(r, z)$  의 좌표 값은 식 (9)와 (12)로 주어지는 연립방정식의 해로서 다음 식과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} r \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cot \phi_1 & -1 \\ \cot \phi_2 & -1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} -z_1 \\ -z_2 \end{bmatrix} \quad (14)$$

IV. 실험

전술한 바와 같이 전방향 영상을 얻기 위하여 사용되는 전방향성 거울에는 구형, 원뿔형, 2차 곡면형, 쌍곡면형이 있으나, 이들 중 2차 곡면형과 쌍곡면형은 거울의 초점을 향한 빛이 미리 정해진 방향으로 반사 된다는 점 때문에 영상 해석이 간단하므로 많이 사용된다[5]. 2차 곡면형 거울의 경우는 반사된 빛이 거울의 중심축과 평행한 방향을 향하므로 직각 투영 영상법(Orthographic imaging)이 필요하고, 쌍곡선형의 경우는 반사된 빛이 대칭되는 쌍곡선 초점을 향하므로 일반적인 원근 영상법(perspective imaging)을 사용한다. 직각 투영 영상법을 위해서는 무한 초점(telecentric) 렌즈와 같은 별도의 부품이 필요하므로, 본 논문에서는 쌍곡면형 거울을 채택하였다. 물론 본 논문에서 제시하는 방법은 2차곡면형 거울을 사용하는 경우에도 적용될 수 있다. 그림 5에 간단한 실험 장치를 보인다. 본 실험장치 제작에 사용된 광학소자들의 기본 사양을 다음 표 1에 요약하였다.

그림 6은 실험장치를 통해 얻은 샘플 영상이다. 그림 6(a)는 원 영상이며, 그림 6(b)는 이를 파노라마 형태로 펼친 영상이다. 그림에서 보는 바와 같이 360도 전방향의 스테레오 영상을 얻을 수 있음을 알 수 있다. 원 영상에서 보듯이 한 물체점에 대한 두 영상점은 영상의 광축을 중심으로

표 1. 실험장치 사양.

Table 1. Specification of experimental setup.

(a) Omni-directional mirror

사양	a	b	반지름	높이	제조사
값	28.095	23.4125	30.0	20.0	NeoVision[1]

(b) Concave lens and camera

사양	오목렌즈		카메라	
	초점거리	반지름	초점거리	해상도
값	50.0	25.0	6 ~ 12	1/3", 1024x768

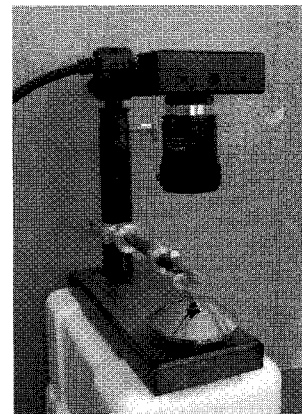
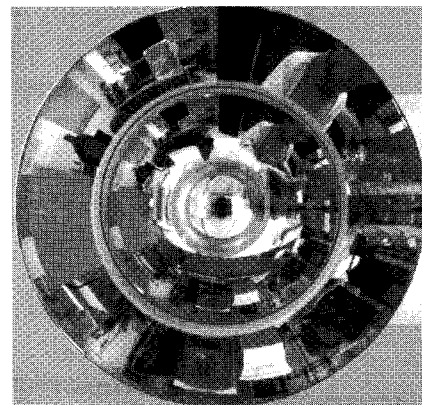


그림 5. 실험장치.

Fig. 5. Experimental setup.



(a) Omni-directional image



(b) Panorama image

그림 6. 실험영상 1.

Fig. 6. Experimental image 1.

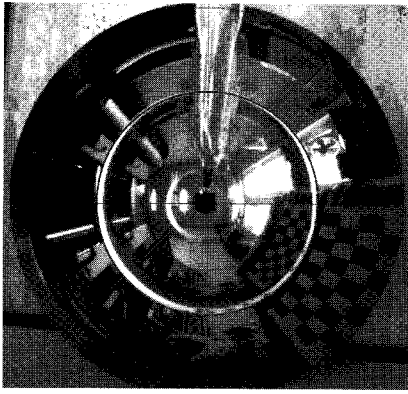


그림 7. 실험 그리드 영상.

Fig. 7. Experimental grid image.

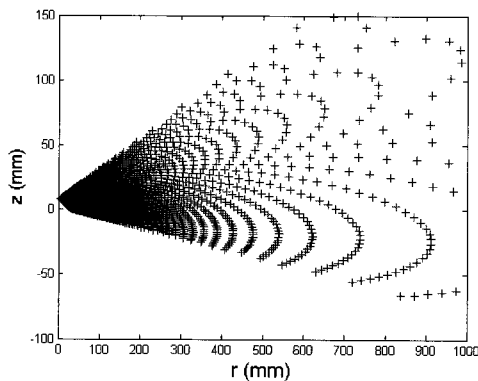


그림 8. 거리에 따른 계산 정밀도.

Fig. 8. Depth resolution.

로 반지름 선상에 함께 놓이며, 단일 카메라를 사용하므로 두 영상점에 대한 내부 매개변수가 동일하기 때문에 쉽게 스테레오 대응점을 찾을 수 있다.

그림 7은 거리계산식에 관련된 매개변수들을 캘리브레이션 통해 구하기 위한 실험 그리드영상이다. 전방향 영상의 안쪽과 바깥쪽 링 영상이 스테레오 쌍을 이루고 있음을 볼 수 있다. 거리계산식에 필요한 매개 변수들은 카메라 핀홀의 위치  $P_1$ , 오목렌즈의 위치  $P_2$ , 카메라의 초점거리  $\lambda$ , 오목렌즈의 초점거리  $f$  등이며, 표 1에 보인 바와 같이 쌍곡면형 거울의 매개변수  $a$ 와  $b$ 는 제조사로부터 주어진다.

그림 8은 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 구한 거리 계산 정밀도(Depth resolution)이다. 거리 계산 정밀도는 거리에 따른 계산 값의 신뢰성을 의미하는데, 그림에서 밀도가 높을 수록 정밀도가 높게 된다. 그림에서 보는 바와 같이 본 시스템에 의한 거리계산이 대략 ~500 mm내에서는 신뢰할 만한 수준이 될 것임을 알 수 있다.

## V. 결론

전방향 영상 시스템은 360도 전방향의 모든 영상정보를 한 번에 효과적으로 담을 수 있기 때문에 근래에 점차 많이 연구되고 있는 분야이다. 본 논문에서는 하나의 카메라를 이용하여 전방향의 스테레오 영상을 획득할 수 있는 새로운 방법을 제안하였다. 제안한 방법은 오목렌즈의 빛 굴

절특성과 볼록 거울의 반사특성을 포함하는 광학소자의 광학특성을 활용한 것이다. 본 방법에서는 이미 상용화되어 있는 오목렌즈와 볼록거울을 사용하므로 경제적으로 쉽게 구현할 수 있다는 장점이 있다.

제안하는 시스템을 통해 얻은 스테레오 영상으로부터 기하광학 해석을 통해 물체점의 3차원 거리정보를 얻을 수 있는 거리 계산식을 도출하였다. 이를 통해 얻을 수 있는 거리 정보는 3차원 물체 인식이나 이동로봇의 주행에 필요한 정보로 활용할 수 있다. 특히 단일 카메라에 의한 전방향 스테레오 영상은 한 물체점에 대한 두 영상점이 동일 반지름 직선상에 놓이며, 같은 광학적인 특성을 가지므로 대응점 해석이 매우 쉽고 잡음에 강인하다는 장점이 있다.

본 시스템으로 획득한 전방향 스테레오 영상에 거리 계산식을 적용하여 거리정보를 얻기 위해서는 각 광학소자들의 사양 매개변수들을 알아내기 위한 사전 캘리브레이션 과정이 필요하다. 본문에서 보인 바와 같이 거리계산식은 복잡한 비선형성을 가지므로 캘리브레이션 과정이 어렵다는 문제점이 있다. 이에 대해서는 현재 연구중에 있다.

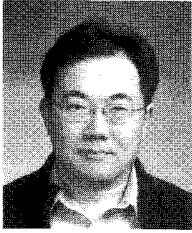
## 참고문헌

- [1] <http://www.neovision.cz>
- [2] J. McBride et. al, "Single camera stereo for mobile robot surveillance," *Proc. of IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition(CVPR'05)*, vol. 3, pp. 128, 2005.
- [3] H. Koyasu, J. Miura, and Y. Shirai, "Recognizing moving obstacles for robot navigation using real-time omnidirectional stereo vision," *Journ. of Robotics and Mechatronics*, vol. 14, no. 2, pp. 147-156, 2002.
- [4] S. Nayar, "Omnidirectional vision," *Proc. of Int'l Symp. of Robotics Research*, Oct, 1997.
- [5] Z. Zhu, "Omnidirectional stereo vision," *Proc. of ICAR'01*, pp. 22-25, 2001.
- [6] J. Gluckman and S. Nayar, "Catadioptric stereo using planar mirrors," *Int'l Journ. of Computer Vision*, vol. 44, no. 1, pp 65-79, 2001.
- [7] 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
- [8] D. Lee and I. Kweon, "A novel stereo camera system by a bi-prism," *IEEE Tr. on Robotics and Automation*, vol. 16, no. 5, pp. 528-541, 2000.
- [9] T. Pajdlar, 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.
- [10] D. Southwell, A. Basu, M. Fiala, and J. Reyda, "Panoramic stereo," *Proc. of ICPR'96*, pp. 378-382, 1996.
- [11] M. Fiala and A. Basu, "Panoramic stereo reconstruction using non-SVP optics," *Computer Vision and Image*

*Understanding*, vol. 98, pp. 363-397, 2005.

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

- [13] 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.



#### 이수영

1988년 2월 연세대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1990년 2월 KAIST 전기및 전자공학과 졸업(공학석사). 1994년 8월 KAIST 전기및전자공학과 졸업(공학박사). 1995년 3월~1999년 8월 KIST 시스템연구부 선임연구원. 1997년 2

월~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 서울산업대학교 전기공학과 부교수. 관심분야는 보행로봇, 로봇비전, 이동로봇 센서.

#### 최병욱

제어·로봇·시스템학회 논문지 제14권 제11호 참조.