

## 이동 로봇의 자율주행을 위한 전방향 능동거리 센서

### Active Omni-directional Range Sensor for mobile robot navigation

°정인수\*, 조형석\*\*

\*한국 과학기술원 자동화및 설계공학과(Tel: 02-958-3923; Fax: 02-968-1638)

\*\*한국 과학기술원 기계공학과 (Tel: 042-968-3213; Fax: 042-968-3210; E-mail: hscho@lca.kaist.ac.kr)

**abstracts** Most autonomous mobile robots view things only in front of them. As a result, they may collide against objects moving from the side or behind. To overcome the problem we have built an Active Omni-directional Range Sensor that can obtain omni-directional depth data by a laser conic plane and a conic mirror. In the navigation of the mobile robot, the proposed sensor system makes a laser conic plane by rotating the laser point source at high speed and achieves two dimensional depth map, in real time, once an image capture. The experimental results show that the proposed sensor system provides the best potential for navigation of the mobile robot in uncertain environment.

**Keyword** Conic mirror, Laser conic plane, Active Omni-directional Range Sensor, depth map

#### 1. 서론

현재 여러 센서들을 이용하여 이동로봇을 자율 주행시키는 많은 연구들이 진행되고 있다. 그중 분해능이 비교적 높은 시각센서를 사용하는 연구가 많이 이루어지고 있는데, 대부분 이동로봇이 주행하는 전(前)면방향의 장애물을 측정하는데만 국한되어 있다. 따라서, 주행시 좌우 측면 또는 뒤에서 접근하는 장애물에 대해서는 충돌을 회피하기가 어렵다. 이에, 전(全)방향을 측정할 수 있는 센서 시스템에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 초음파 센서를 이동로봇의 주변에 설치하여 주행하는 방법[1]-[5]들이 많이 행해지고 있지만, 그 측정 분해능이 좋지 못하고 장애물의 형태에 따른 반사파 신호의 오차가 심각하다. 반사파 신호의 오차를 줄이기 위한 연구[6]도 진행되었으나 초음파 센서 자체가 갖고있는 낮은 분해능에 대한 문제를 극복할수는 없다. 타임오브 플라이트 레이저 파인더(Time-of-flight range finder)를 회전하므로써 전방향의 거리정보를 구하는 방법[7][8]도 사용되었는데, 처리시간이 길고, 고가의 정교한 타이밍 회로가 필요할 뿐더러 반사파 신호의 오차도 유발된다는 문제점들이 있다. 또한, 카메라를 회전시키는 방법[9]은 처리시간이 너무 길고 절대적인 거리를 측정할수 없다는 단점이 있다. 원뿔 거울[10][11] 또는 구면형 거울[12], 쌍곡선형 거울[13], 어안 렌즈[14]등을 사용하는 방법들도 연구되었는데, 한번의 영상 포착으로 전(全)방향을 볼수 있다는 장점은 있으나, 한대의 카메라를 사용하므로써 주변환경에 대한 특징치만 검출해 낼뿐 이동로봇의 자율주행시 중요한 정보가 되는 장애물과의 절대적인 거리는 측정이 불가능하다. 원뿔 거울과 초음파 센서를 조합한 연구[15]도 이루어 졌으나, 이 또한 초음파 센서의 낮은 측정 분해능으로 인해 장애물간의 정확한 위치측정 및 이동로봇의 자기 위치보정에 대한 정확도가 떨어진다. 이에 본 연구에서는 원뿔 거울&카메라와 원뿔형 레이저면을 이용한 전방향 능동 거리 센서시스템을 제안하여 이동 로봇의 자율주행에 적용해 보고자 한다. 제안된 센서 시스템은 삼각 측정법에 의해 한번에 전(全)방향에 산재되어 있는 장애물간의 거리를 정확히 구하고, 그 측정된 거리정보는 이동 로봇의 자율주행

뿐만 아니라 이동 로봇의 절대적인 위치와 자세를 알아내는 자기 위치보정 작업에 있어서도 매우 중요한 정보로 이용된다. 또한, 원뿔형 레이저면을 위아래로 이동시켜 측정된 이차원 거리정보들을 조합하여 주변환경에 대한 삼차원 거리정보를 만들수 있으므로 물체 인식 작업도 수행할수 있다.

#### 2. 제안된 센서 시스템

CCD 카메라와 원뿔거울을 적절히 배치하면 원뿔 거울의 고유한 특성에 의해 전(全)방향의 주변환경을 한번에 볼수 있게 된다. 그 특성을 이용하기 위해 본 연구에서는 원뿔 거울과 CCD 카메라를 수직으로 배치하고, 전(全)방향의 거리정보를 구하기위해 그 수직축 선상에 레이저 포인트 소스를 두어 수직축 중심으로 회전시키므로써 원뿔형의 레이저면을 형성시켰다. 즉, 레이저 포인트 소스를 고속으로 회전시켜 주변환경에 레이저 띠가 형성되도록 하고, 원뿔 거울을 통해 전(全)방향에 맺힌 레이저 띠 영상을 카메라로 읽어들인다. 이때 레이저 띠는 방위각에 따라 유일하게 결정되는 각 레이저 포인트들의 집합체이므로 삼각 측정법을 이용하여 각 레이저 포인트들에 대한 거리를 측정하면 한번에 주변환경에 대한 이차원 거리정보를 구하는 결과가 된다. 또한 원뿔형의 레이저 면을 위,아래 각도로 조절하면서 이차원 거리정보를 조합해 나가면 전(全)방향의 주변환경에 대한 삼차원 거리정보도 얻을수 있다.

##### 2.1 센서 시스템 구성

제안된 센서 시스템은 크게 레이저 소스부와 카메라 검출부로 이루어져 있다. 레이저 소스부는 점광원인 레이저와 그 광원의 어떤 방향으로도 주사하여줄 수 있는 기구부 및 제어부로 구성되며, 카메라 검출부는 전(全)방향을 한번에 볼수 있도록 해주는 원뿔 거울과 CCD 카메라 및 필터등으로 구성되어 있다. 센서 시스템의 구성개략도는 그림 1 과 같다. 이때 레이저 소스와 원뿔 거울의 중심은 같은 수직축 선상에 있으며, 레이저 소스를 수직축 중심으로 회전시켜서 원뿔형

의 레이저면을 형성시키고 원뿔 거울을 이용하여 전(全)방향에 맺힌 레이저면 영상을 카메라로 읽어들이어 삼각 측정법을 이용, 한번에 주변환경에 대한 이차원 거리 정보를 구한다. 이때 사용코자 하는 CCD 카메라가 영상을 포착하는 시간이 약 1/30 초 이고 그시간이내에 전(全)방향에 대해 적어도 한번은 레이저광이 주사될 수 있어야 하므로 수직축 중심으로 회전하는 레이저 회전 구동 모터 회전수는 1800 rpm 이상은 되어야 한다.

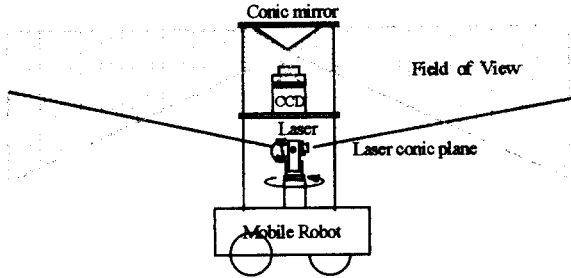


그림 1. 제안된 센서 시스템의 구성 개략도  
Fig. 1. Schematic diagram of the proposed sensor system

## 2.2 주변환경의 거리 정보 추출

그림 2 는 소스부와 검출부의 구성 배치 및 삼각법에 의한 삼차원 거리정보 추출을 위한 기본 좌표계를 나타내고 있다. 레이저빔이 거리를 측정코자 하는 물체  $P_i$  점에 주사되고 그 점은 원뿔 거울을 통해 CCD 이미지의  $P_i$  에 투영된다. 이때 거리측정 계산을 쉽게 하기위해 레이저 소스와 원뿔 거울의 중심 및 CCD 카메라의 중심은 모두 Z 축 선상에 존재하도록 설계하였다. 그림 3 은 그림 2 를 X-Y 축으로 투영한 것으로서, 측정코자 하는  $P_i$  점은 이미지의  $P_i$  에 투영되고 방위각  $\theta$  는

$$\tan \theta = \frac{y_i}{x_i} = \frac{Y_i}{X_i} \quad (1)$$

로 원뿔 거울의 특성인 방위각의 불변성에 의해 원점을 기준으로 측정점과 이미지면으로의 투영된 점에 대한 방위각  $\theta$  는 동일하다. 또한 그림에서 알수있듯이

$$r_i = \sqrt{x_i^2 + y_i^2} \quad (2)$$

$$x_i = r_i \cos \theta \quad (3)$$

$$y_i = r_i \sin \theta \quad (4)$$

가 된다.

그림 4 는 그림 2 를 R-Z 좌표계로 투영한 것으로서, 다음과 같은 식들을 이용하여 삼각법에 의해 실제 물체의 거리정보를 알아낼 수 있다. 원뿔 거울에서 반사되어 카메라로 투영되는 광의 직선방정식은

$$Z = \tan \beta R + H_c \quad (5)$$

원뿔 거울에서 반사되는 점  $P_m(r_m, z_m)$ 은

$$r_m = \frac{H_m - H_c}{\tan \beta - \tan(90^\circ - \alpha/2)} \quad (6)$$

$$z_m = \tan \beta r_m + H_c \quad (7)$$

여기서,  $\alpha$  = 원뿔 거울 꼭지점각

$\beta = \tan^{-1}(f/r_i)$ ,  $f$  = 초점거리

$P_m$  에서  $P_i$  로의 직선 방정식은

$$Z = z_m + \tan \omega (r_m - R) \quad (8)$$

여기서,  $\omega = \alpha + \beta - 180^\circ$

레이저 광이 주사되는 직선방정식은

$$Z = \tan \phi R + H_1 \quad (9)$$

(8), (9) 식에 의해

$$r_i = \frac{z_m + \tan \omega r_m - H_1}{\tan \omega + \tan \phi} \quad (10)$$

그러므로 (3), (4), (9), (10) 식에 의해

$$x_i = \left( \frac{z_m + \tan \omega r_m - H_1}{\tan \omega + \tan \phi} \right) \cos \theta \quad (11)$$

$$y_i = \left( \frac{z_m + \tan \omega r_m - H_1}{\tan \omega + \tan \phi} \right) \sin \theta \quad (12)$$

$$z_i = \tan \phi r_i + H_1 \quad (13)$$

값을 구하므로써 실제 측정코자하는 점  $P_i(x_i, y_i, z_i)$  까지의 거리를 알아낼 수 있다. 이에 이미지에 검출된 픽셀들을 이용하여 각 방위각에 대한 거리 정보값을 구하므로써 한번의 영상 포착으로 전(全)방향에 대한 이차원 거리정보를 계산해 낸다.

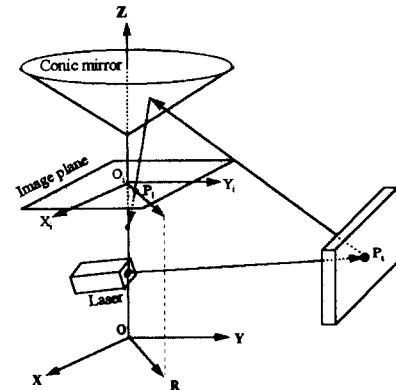


그림 2. 거리 정보 계산을 위한 기본좌표계  
Fig. 2. Basic coordinate for depth calculation

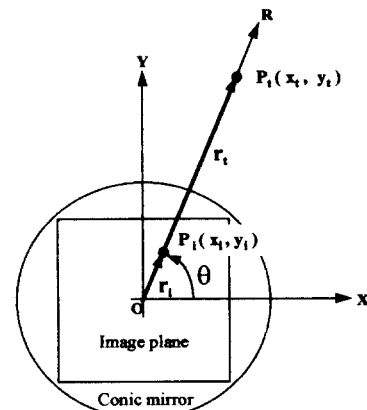


그림 3. X-Y 좌표계의 기하학적 관계  
Fig. 3. Geometric relation of X-Y coordinate

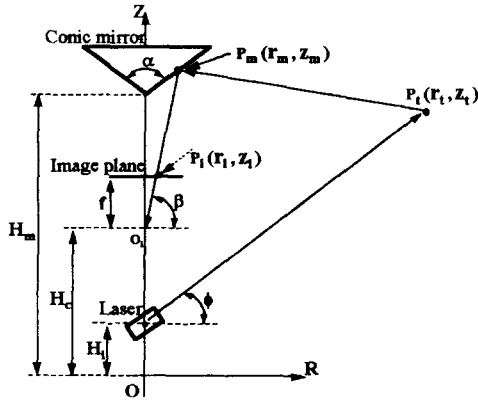


그림 4. R-Z 좌표계의 기하학적 관계  
Fig. 4. Geometric relation of R-Z coordinate

### 2.3 센서 시스템 설계

제안된 센서 시스템을 이동 로봇의 자율주행에 이용하기 위해서는 몇가지 중요한 설계조건을 고려해야 한다. 첫째, 레이저에 관한 것으로 주사되는 레이저에 대한 안전성을 확보하기 위해 레이저의 위치는 낮을수록 좋은데, 본 연구에서는 기구적인 설계 제약을 고려하여 레이저 위치인  $H_c$  값을 390mm로 결정하였다. 또한, 자율주행시에는 먼거리까지 장애물의 유무 측정이 가능해야 하므로 그림 5에서 알수있듯이 레이저 소스가 마루와 평행하게 주사되도록 설정하였다.

둘째로는 유효 측정 가능 영역에 관한것으로 그림 5에서 알수있듯이 높이 방향으로 측정 가능한 영역을 이동 로봇의 높이고 일치하도록 설계하였다. 더 높은 영역까지 측정하고자 한다면 원뿔 거울의 꼭지점 각도를 더 작게 하면 된다. 이에 본 연구에서는 측정 가능한 높이를 결정하는 매개변수으로써 원뿔 거울의 꼭지점 각도까지의 거리인  $H_m$ 을 기구적인 설계의 균형을 고려하여 640mm로 결정하였다. 거리 방향으로 상기의 설계 기준에 의해 이론적으로는 무한대의 거리까지 측정이 가능하나 레이저 소스의 파워에따라 CCD 카메라에 집지될수있는 거리의 한계가 있다. 현재 사용중인 다이오드 레이저(634 nm, 12mW)를 고려하여 전방향에 대한 장애물 검지가 가능한 측정 거리 영역을 0.6m ~ 3m로 결정하였는데, 이는 이동 로봇이 장애물을 검지하고 이에 대응하는데 충분한 시간적 여유를 가질수있는 거리라고 판단하였다.

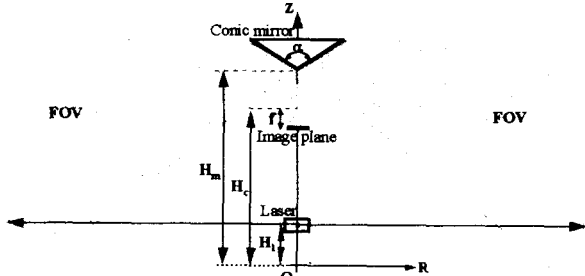


그림 5. 이동로봇 자율주행을 위한 시스템 구성  
Fig. 5. System configuration for mobile robot navigation

그러면 상기의 설계 조건에 의해 시스템 설계 매개변수를 결정하고자 한다. CCD 카메라의 초점 거리가 주어지면 설정한 FOV를 만족하기 위한 원뿔 거울의 꼭지점 각도인  $\alpha$ 는 다음식에 의해 유일하게 결정된다.

$$\beta_{\max} = \tan^{-1}\left(\frac{f}{L/2}\right) \quad (14)$$

$$\alpha + \beta_{\max} = 180^\circ \quad (15)$$

여기서,  $L$  = CCD cell 크기

이에 초점 거리에 따른 측정 가능한 최소 거리  $D_{\min}$ 를 계산하여 보면

$$Z = -\tan(\alpha - 90^\circ)R + H_m \quad (16)$$

$$Z = H_i \quad (17)$$

식(16)과 (17)의 교점이 최소 거리  $D_{\min}$ 이 되므로

$$D_{\min} = \frac{H_m - H_i}{\tan(\alpha - 90^\circ)} \quad (18)$$

가 된다. 초점 거리에 따른 측정 가능 최소거리에 따라 상기의 설계기준에 적합한 초점 거리로 상품화되어 있는 7.5 mm로 선정하였는데, 이에 따라 제작된 센서 시스템의  $D_{\min}$  값은 586 mm이며, 원뿔 거울 꼭지점 각도  $\alpha$ 는  $113^\circ$ 가 된다.

### 2.4 센서 시스템 보정

제안된 센서 시스템의 구조를 결정하는 매개변수중 제작후 직접 그 크기를 잴수없는 변수는 CCD 카메라까지의 높이인  $H_c$ 이다. 이에 알고있는 기준점  $P_s(R_s, Z_s)$ 에 레이저를 주사하고 CCD 카메라를 통해 입력된 영상을 통해 (6),(7),(10)식에 의해  $H_c$  값을 보정해 줄수있다.

$$H_c = \frac{H_m - \left[ \frac{\tan\beta - \tan(90^\circ - \alpha/2)}{\tan\beta + \tan\omega} \right] (\tan\alpha + \tan\omega)R_s + H_i}{\left( \frac{\tan\omega + \tan(90^\circ - \alpha/2)}{\tan\beta + \tan\omega} \right)} \quad (19)$$

하나의 기준점만을 가지고도  $H_c$ 를 구할수 있으나 그 정확도를 높이기 위해  $90^\circ$  간격으로 3 점(1 m, 1.5 m, 2m)씩 12개의 기준점들을 이용하여  $H_c$  값을 구했는데 그 값은 535 mm이었다. 그러면 결정된 설계 변수값을 가지고 제안된 센서 시스템의 이미지 픽셀간의 해상도인  $R_d$ 를 계산해 보면

$$\Delta P = \frac{L}{640} \text{ (mm / pixel)} \quad (20)$$

$$\tan\beta(k) = \frac{f}{\Delta P \cdot k} \quad (21)$$

식(10)에 의해

$$r_i(k) = \frac{z_m(k) + \tan\omega(k) r_m(k) - H_i}{\tan\omega(k)} \quad (22)$$

$$R_d = r_i(k+1) - r_i(k) \quad (23)$$

가 된다.

상기의 식에 의해 구해진 해상도의 범위는 2.6 mm ~ 40.1mm이다. 즉, 각 픽셀간의 최대 거리 측정오차가 3m에서 약 4cm인데, 이 정도의 오차는 이동로봇이 정상적으로 자율주행하는데 무리가 없는 허용 거리오차라고 생각한다. 그리고, 측정가능한 물체의 높이인  $D_H$ 는 (6), (7)식에 의해 다음과 같이 계산될수 있는데, 그 값은 약 681mm이다.

$$D_H = \left( \frac{H_m - H_c}{f / (L/2) - \tan(90^\circ - \alpha/2)} \right) \frac{f}{L/2} + H_c \quad (24)$$

### 3. 실험 결과

제안된 센서 시스템의 성능을 평가하기위해 이동 로봇의 자율주행을 위한 이차원 거리 정보를 구하여 보았다. 이때 원뿔 거울을 통해 포착되는 영상의 노이즈를 줄이기 위해 CCD 카메라 앞에 630nm 밴드패스 필터(bandpass filter)를 부착하였다. 레이저 빔의 각도  $\phi$ 는  $0^\circ$ 로 설정하였다. 그림 6 (a)

는 실험한 장소이며, 그림 6 (b) 는 레이저 포인트 소스를 회전시킴에 의해 형성된 레이저미를 원뿔 거울을 통해 한번에 포착한 후 스톱스레싱(thresholding)한 영상이다. 또한 그림 6 (c)는 실험장소의 실제 크기와 센서 시스템에 의해 구해진 측정 데이터를 함께 보여주고 있다. 최대 측정오차가 56.5mm 이고 측정거리가 멀수록 그 측정오차가 커지는 것을 알수있다. 또한 전(全)영역에 대한 측정오차의 원인으로는 다음과 같은것이 있다. 그림 6(b)의 영상에서 거리 정보들을 구해내기 위해서는 각 방위각에 대응하는 단 하나의 픽셀을 추출해야 한다. 이를 위해 싹닝(thinning) 작업이 수행되는데 이로인해 1~2 픽셀의 오차가 발생할수 있다. 또한 실험하는 장소의 마루가 고르지 못하면 측정오차가 더욱 커지게 된다.

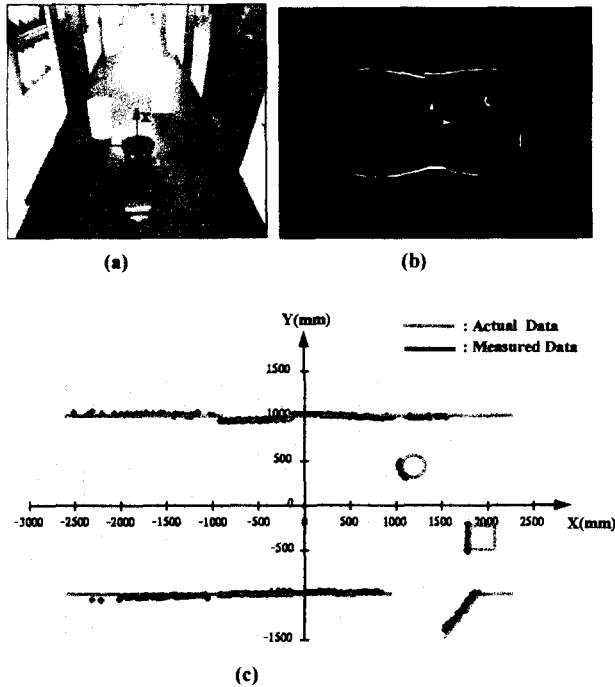


그림 6. (a) 실험 주변 환경  
 (b) 원뿔 거울에 의해 포착된 영상  
 (c) 주변환경에 대한 거리측정 결과  
 Fig. 6. (a) Experimental environment  
 (b) Input image reflected by conic mirror  
 (c) Result of measured 2-Dimensional depth data

#### 4. Conclusion

본연구에서는 개선된 형태의 이동 로봇용 센서시스템을 제안하고, 거리측정 알고리즘 및 시스템 설계에 대해 논하였다. 또한 그 성능을 평가하기 위해 이차원 거리정보를 추출하므로써 이동 로봇 자율주행을 위한 주변환경의 인식에 대한 실험을 수행하였다. 결론적으로 본 센서 시스템은 유효측정영역에서 약 60mm 이하의 측정오차가 발생하는데 이 정도의 거리 측정오차는 이동 로봇에 적용된다는 관점에서 허용이 가능한 측정 오차라고 사려된다. 앞으로 제안된 센서시스템의 측정 정밀도를 높이기 위한 더욱 개선된 형태의 시스템 설계를 고려해 보고자 한다. 또한, 본 시스템은 레이저에 의한 레인지(range) 정보와 더불어 주변환경에 대한 순수한 인텐시티(intensity) 정보도 함께 얻을수 있는 구조로 되어있다. 이에 현재는 본 센서시스템에서 동시에 읽어들이는 두 정보의 각

각의 장점을 적절히 결합하여 이동 로봇의 자기 위치보정 및 자율주행에 응용하는 연구를 진행중이다.

#### 참고 문헌

- [1] A. Elfes, " Sonar-based real world mapping and navigation ", IEEE Journal of Robotics and Automation, vol. RA-3, no. 3, pp. 249-265, 1987.
- [2] H. R. Beom, H. S. Cho, " A sensor-based navigation for a mobile robot using fuzzy logic and reinforcement learning", IEEE trans. on Systems, Man and Cybernetics, vol. 25, no. 3, pp. 464-477, 1995.
- [3] F. G. Pin, Y. Watanabe, " Using fuzzy behaviors for the outdoor navigation of a car with low resolution sensors", IEEE Int. Conf. on Robotics & Automation, pp. 548-553, 1993.
- [4] M. Buchberger, K. et al. " Laserradar and sonar based world modeling and motion control for fast obstacle avoidance of the mobile robot MOBOT-IV", IEEE Int. Conf. on R & A, pp. 534-540, 1993.
- [5] M. G. Slack, " Fixed computation real-time sonar fusion for local navigation", IEEE Int. Conf. on R & A, pp. 123-129, 1993.
- [6] H. Peremans, J. V. Campenhout, " Tri-aural perception on a mobile robot", IEEE Int. Conf. on Robotics & Automation, pp. 265-270, 1993.
- [7] E. Freund, F. Dierks, " Laser scanner based free navigation of autonomous vehicles", Control Eng. Practice, vol. 2, pp. 299-304, 1994.
- [8] G. L. Miller, E. R. Wagner, " An optical rangefinder for autonomous robot cart navigation", in Proc. SPIE MobileRobots II, vol. 852, pp. 132-144, 1987.
- [9] H. Ishiguro, M. Yamamoto and S. Tsuji, " Omnidirectional stereo for making global map", in Proc. 3rd Int. Conf. Computer Vision, 1990.
- [10] Y. Yagi et al, " Real-time omnidirectional image sensor (COPIs) for vision-guide navigation ", IEEE trans. on Robotics & Automation, vol. 10, no. 1, pp. 11-22, 1994.
- [11] Y. Yagi et al, " Map-based navigation for mobile with omnidirectional image sensor (COPIs)", IEEE trans. on Robotics & Automation, vol. 11, no. 5, pp. 634-647, 1995.
- [12] J. Hong et al, " Image based homing ", Proc. Int. Conf. Robotics & Automation, pp. 620-625, 1991.
- [13] K. Yamazawa et al, " Obstacle detection with omnidirectional image sensor hyperomni vision ", IEEE Int. Conf. on Robotics & Automation, pp. 1062-1067, 1995.
- [14] Z. L. Cao et al, " Dynamic omnidirectional vision for mobilerobots ", J. Robotic Systems, vol. 3, no. 1, pp. 5-17, 1986.
- [15] S. W. Bang, W. Yu and M. J. Chung, " Sensor-based local homing using omni directional range & intensity sensing system for indoor mobile robot navigation", IEEE Int. Conf. on IROS, pp. 542-548, 1995.