

전방향 능동 거리 센서를 이용한 2차원 거리 측정

Two-Dimensional Depth Data Measurement using an Active Omni-Directional Range Sensor

정인수, 조형석
(In-Soo Joung, and Hyung-Suck Cho)

Abstract : Most autonomous mobile robots view only things in front of them, and as a result, they may collide with objects moving from the side or behind. To overcome this problem, an active omni-directional range sensor system has been built that can obtain an omni-directional depth map through the use of a laser conic plane and a conic mirror. In the navigation of the mobile robot, the proposed sensor system produces a laser conic plane by rotating the laser point source at high speed; this creates a two-dimensional depth map, in real time, once an image is captured. The results obtained from experiment show that the proposed sensor system is very efficient, and can be utilized for navigation of a mobile robot in an unknown environment.

Keywords : active omni-directional range sensor, conic mirror, laser conic plane, depth map, mobile robot

I. 서론

현재 외부용 센서와 내부용 센서등을 이용하여 이동로봇을 자율 주행시키는 많은 연구들이 진행되고 있다. 내부용 센서로는 이동로봇의 운동을 이용하여 그 자신의 위치를 알아내는 것으로서 엔코더, 타코미터, 자이로스코프, 가속도계 등이 있다. 이러한 센서들은 절대적인 이동로봇의 움직임을 알 수는 있지만, 주행거리가 길어지거나 바퀴의 미끄러짐이 발생하면 치명적인 누적 오차를 유발시킨다. 외부용 센서의 목적은 주위환경에 대해 이동로봇의 위치를 상대적으로 측정하여 그 주위환경을 인식하는데 있다. 이러한 센서로는 CCD 카메라, 초음파 센서, 레이저 센서, 접촉 센서 등이 있는데 처리 시간의 속도, 측정 분해능, 가격 등의 관점에서 구별되는 각각의 장단점을 가지고 있다. 현재 분해능이 비교적 높은 시각 센서를 사용하는 연구[1]-[6]가 많이 이루어지고 있는데, 대부분 이동로봇이 주행하는 전(前)방향의 장애물을 측정하는데 만 국한되어있다. 따라서, 주행 시 좌우 측면 또는 뒤에서 접근하는 장애물을 회피하기가 어렵다. 이에, 전(全)방향을 측정할 수 있는 센서 시스템에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 초음파 센서를 이동로봇의 주변에 설치하여 주행하는 방법[7]-[11]들이 많이 행해지고 있지만, 그 측정 분해능이 좋지 못하고 장애물의 형태에 따른 반사파 신호의 오차가 심각하다. 반사파 신호의 오차를 줄이기 위한 연구[12]도 진행되었으나 초음파 센서 자체가 갖고있는 낮은 분해능에 대한 문제를 극복할 수는 없다. 타임오브플라잇 레인지파인더(time-of-flight range finder)를 회전하므로써 전(全)방향의 거리 정보를 구하는 방법[13][14]도 사용되었는데, 처리 시간은 빠르나, 고가의 정교한 타이밍 회로가 필요할 뿐더러 반사파 신호의 오차도 유발된다는 문제점들이 있다. 또한, 카메

라를 회전시키는 방법[15]은 처리 시간이 너무 길고 절대적인 거리를 측정할 수 없다는 단점이 있다. 원뿔 거울(Conic mirror)[16][17] 또는 구면 거울(spherical mirror)[18], 쌍곡선형 거울(hyperboloidal mirror)[19], 어안 렌즈(fish-eye-lens)[20]등을 사용하는 방법들도 연구되었는데, 한번의 영상 포착으로 전(全)방향을 볼 수 있다는 장점은 있으나, 한대의 카메라를 사용하므로써 주변 환경에 대한 특징치 만을 검출해 뿐 이동로봇의 자율 주행 시 중요한 정보가 되는 장애물과의 절대적인 거리는 측정이 불가능하다. 원뿔 거울과 초음파 센서를 조합한 연구[21]도 이루어 졌으나, 이 또한 초음파 센서의 낮은 측정 분해능으로 인해 장애물간의 정확한 위치 측정 및 이동로봇의 자기 위치 추정에 대한 정확도가 떨어진다.

이에 본 논문에서는 원뿔 거울과 CCD 카메라 및 원뿔형 레이저면을 이용한 전방향 능동 거리 센서 시스템(active omni-directional range sensor system)을 제안하여 이동로봇의 자율 주행에 적용해 보고자 한다. 제안된 센서 시스템은 레이저 접광원을 고속으로 회전시켜 주변 환경에 레이저 띠를 형성시키고 원뿔 거울을 통해 전(全)방향에 맷한 레이저 띠 영상을 카메라로 읽어 들인다. 이때 읽혀진 영상에 삼각 측정법(triangulation method)을 적용하여 한번에 주변 환경에 대한 2차원 거리 정보를 구하고, 그 측정된 거리 정보는 이동로봇의 자율 주행뿐만 아니라 이동로봇의 절대적인 위치와 자세를 알아내는 자기 위치 보정 작업에 있어서도 매우 중요한 정보로 이용된다.

II. 제안된 센서 시스템

CCD 카메라와 원뿔 거울을 적절히 배치하면 원뿔 거울의 고유한 특성에 의해 전(全)방향의 주변 환경을 한번에 볼 수 있게 된다. 그 특성을 이용하기 위해 본 연구에서는 그림 1과 같이 원뿔 거울과 CCD 카메라를 수직으로 배치하고, 전(全)방향의 거리 정보를 구하기 위해 그 수직축 선상에 레이저 광원을 두어 수직축 중심으로

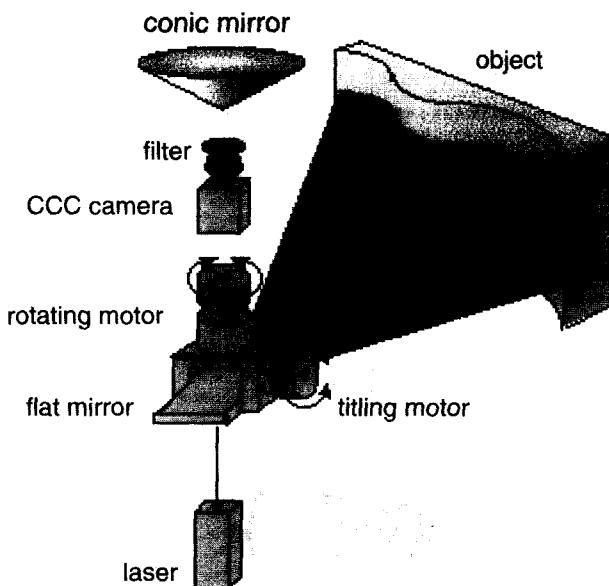


그림 1. 제안된 센서 시스템의 구성 개략도.

Fig. 1. The schematic diagram of the proposed sensor system.

회전시키므로써 원뿔형의 레이저면을 형성시켰다.

즉, 레이저 점광원을 고속으로 회전시키면 잔상현상에 의해 주변환경에 레이저띠가 형성되고, 원뿔 거울을 통해 전(全)방향에 맷한 레이저 띠 영상을 카메라로 읽어들인다. 이때 레이저 띠는 방위각(azimuth angle)에 따라 유일하게 결정되는 각 레이저 점 광원들의 집합체이므로 삼각 측정법을 이용하여 각 레이저 점 광원들에 대한 거리를 측정하면 한번에 주변 환경에 대한 2차원 거리 정보를 구하는 결과가 된다. 이에 제안된 센서 시스템의 장점은 다음과 같다.

첫째, 한번의 영상 포착으로 전(全)방향에 대한 이차원 거리 정보를 구할 수 있으므로 이동로봇과 같은 전(全)방향에 대한 장애물을 인식할 필요가 있는 시스템에는 유효한 센서 시스템이다. 둘째, 주사하는 레이저의 파장 대에 맞는 밴드 패스 필터(band-pass filter)를 통해 영상을 포착하므로 영상에 대한 전처리 과정이 매우 간단하며, 거리를 측정하는 계산 역시 빠른 속도로 이루어질 수 있어 실시간으로 주변 환경에 대한 2차원 거리 정보를 구할 수 있다. 세째, 원뿔형의 레이저 면을 위, 아래 각도로 조절하면서 얻어진 2차원 거리 정보들을 조합해나가면 전(全)방향의 주변 환경에 대한 3차원 거리 정보도 얻을 수 있다. 즉 물체 인식 작업에도 응용될 수 있다. 그림 2는 제안된 센서 시스템을 제작하여 이동로봇에 실제 장착한 전체 시스템을 보여주고 있다. 센서 시스템 제작에 사용된 레이저 점광원은 634nm-12mW 다이오드 레이저(Power Tech. Co.)이고 CCD 카메라는 1/2" XC-75(Sony Co.)이며, 630nm용 밴드 패스 필터를 부착하였다. 또한 전체 시스템의 크기는 420mm×460mm×730mm (너비×길이×높이)이며, i586(75Mhz) PC와 DT-2867 비전 보드(Data Translation Co.)가 사용되었다.

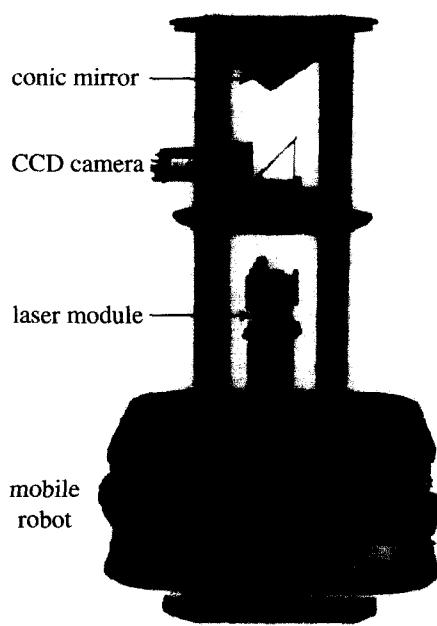


그림 2. 제작된 전방향 능동거리 센서 시스템.

Fig. 2. The proposed sensor system, mounted on a mobile robot.

1. 센서 시스템 구성

그림 1에서 알 수 있듯이 제안된 센서 시스템은 크게 광원과 카메라 검출부로 이루어져 있다. 광원은 점 광원인 레이저와 그 광원을 어떤 방향으로도 주사하여줄 수 있는 기구부 및 제어부로 구성되며, 카메라 검출부는 전(全)방향을 한번에 볼 수 있도록 해주는 원뿔 거울과 CCD 카메라 및 필터 등으로 구성되어 있다. 이때 레이저 광원과 원뿔 거울의 중심은 같은 수직축 선상에 있으며, 레이저 광원을 수직축 중심으로 회전시켜서 원뿔형의 레이저면을 형성시키고 원뿔 거울을 이용하여 전(全)방향에 맷한 레이저면 영상이 카메라에 맷하게 한다. 이에 삼각 측정법을 이용하여 한번에 주변 환경에 대한 2차원 거리 정보를 구하게 된다. 이때 사용코자 하는 CCD 카메라가 영상을 포착하는 시간이 약 1/30초이고 그 시간 이내에 전(全)방향에 대해 적어도 한번은 레이저가 주사 될 수 있어야 하므로 수직축 중심으로 회전하는 레이저 회전 구동 모터 회전 수는 1800 rpm 이상은 되어야 한다. 또한 주변 환경에 대한 3차원 거리 정보를 알기 위해서는 원뿔형의 레이저 면을 위, 아래로 움직일 수 있어야 하는데 이를 위해 높은 분해능(0.2%/pulse)을 갖는 스텝 모터를 사용하였다.

2. 센서 시스템의 광로 해석

이제 주변 환경에 대한 실제 거리 정보를 알아내기 위해서는 제안된 센서 시스템의 광로 해석이 필요하다. 광로를 직교 좌표계에서 표현하기 위해 점(point), 광 방향(ray direction), 표면 수직 벡터(surface normal vector) 등이 사용될 것이다. 벡터의 한 점은 P_a 로 표현된다. 즉, $P_a = [x_a, y_a, z_a]^T$ 로 나타낼 수 있다. 이와 마찬가지로 단위 광 방향 벡터(unit ray direction vector)의 요소는 $u_b = [l_b, m_b, n_b]^T$ 로 표현되며 단위 수직 벡터(unit normal

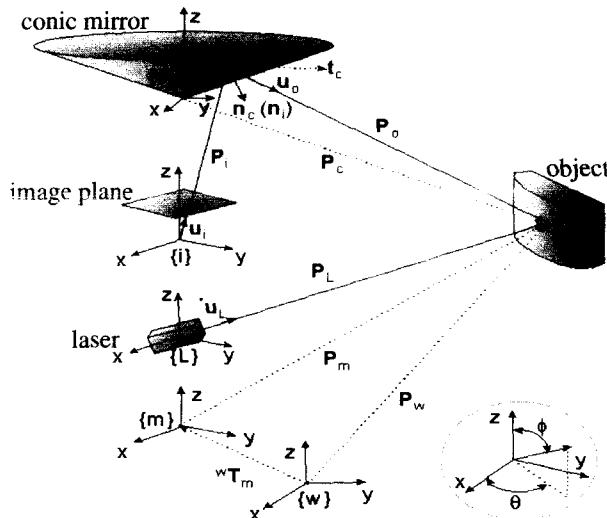


그림 3. 거리 측정을 위한 기본 좌표계.

Fig. 3. Basic coordinate system for depth measurement.

vector)의 요소는 $n_c = [l_c, m_c, n_c]^T$ 로 표현되어 질 수 있다. 또한 각 좌표계에 대한 방위각(azimuth angle)은 θ 로, 천정각(zenith angle)은 ϕ 로 표현한다. 이때 d 는 벡터의 크기를 나타내는 크기 매개변수(scale parameter)이다. 만약, \mathbf{P}_o 의 단위 광 방향 벡터가 \mathbf{u}_o 로 표현된다면 \mathbf{P}_o 는 다음과 같이 쓰여질 수 있다

$$\mathbf{P}_o = d\mathbf{u}_o. \quad (1)$$

따라서 직교 좌표계에서의 광로는 광로 상의 한 점과 크기 매개변수 d 및 광 방향 벡터로 표현될 수 있다. 그림 3은 직교 좌표계를 이용하여 나타낸 본 센서 시스템의 각 모듈에 대한 구성도이다. 레이저가 회전을 하므로 전방향에 대한 레이저면을 형성하고 이 레이저면에 의해 주변 환경에 레이저 띠가 만들어 진다. 이 레이저 띠는 원뿔 거울을 통해 CCD 이미지에 투영된다. 이때 그 레이저 띠는 레이저 점 광원들의 집합체 이므로 각 방위각에 대응되는 레이저 점 광원을 구하여 거리를 계산하고, 이 작업을 모든 방위각에 대해 수행하면 전(全) 방향에 대한 2차원 거리 정보를 구할 수 있다.

방위각에 따른 광로 해석은 모두 동일하므로 영상에 투영된 레이저 띠 중 특정한 방위각에 의해 결정되는 하나의 레이저 점 광원에 대한 광로를 해석하고, 그에 따라 유도된 거리 측정식을 모든 방위각에 적용하면 된다. 이에 임의의 특정한 방위각 θ 에 대응하는 광로 \mathbf{P}_m 에 대해 해석하고자 한다. 원뿔 거울 좌표계(conic mirror frame){c}에서의 단위 표면 수직 벡터 \mathbf{n}_c 는

$$\mathbf{n}_c = \frac{\mathbf{N}_c}{\|\mathbf{N}_c\|} = \frac{\mathbf{t}_c \times \mathbf{l}_c}{\|\mathbf{t}_c \times \mathbf{l}_c\|} = \frac{1}{\sqrt{(1 + \tan^2(\alpha/2))}} \begin{bmatrix} \cos\theta_c \\ \sin\theta_c \\ -\tan(\alpha/2) \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서 (α = 원뿔 거울의 꼭지각)

$$\text{tangential vector } \mathbf{t}_c = [-r\sin\theta_c, r\cos\theta_c, 0]^T$$

$$\text{lateral vector } \mathbf{l}_c = [z\tan(\alpha/2)\cos\theta_c, z\tan(\alpha/2)\sin\theta_c, z]^T.$$

그러므로 영상 좌표계(image frame){i}에서의 단위 표면 수직 벡터 \mathbf{n}_i 는 다음과 같다

$$\mathbf{n}_i = {}^i\mathbf{R}_c \mathbf{n}_c. \quad (3)$$

여기서 ${}^i\mathbf{R}_c$ 는 좌표계{c}에 대한 좌표계{i}의 회전 행렬이다[22].

이때 임의의 곡면을 갖는 거울에 대한 단위 수직 벡터가 $\mathbf{n} = [l, m, n]^T$ 로 표현된다면 참고문헌[23]에 따라 입사 되는 광로 \mathbf{u}_{input} 와 반사되는 광로 \mathbf{u}_{output} 간의 관계식은 다음과 같다

$$\mathbf{u}_{output} = \mathbf{M}_{3 \times 3} \cdot \mathbf{u}_{input}. \quad (4)$$

여기서 $\mathbf{M}_{3 \times 3}$ 는 단위 수직 벡터 $\mathbf{n} = [l, m, n]^T$ 로 표현되는 반사 행렬(reflection matrix)이다.

$$\mathbf{M}_{3 \times 3} = \begin{bmatrix} 1 - 2l^2 & -2ml & -2nl \\ -2ml & 1 - 2m^2 & -2nm \\ -2nl & -2nm & 1 - 2n^2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

그러므로 (4)에 의해 입사 된 광로와 원뿔 거울의 수직 벡터에 의해 반사되어지는 광로의 단위 광 방향 벡터를 구할 수 있다. 즉, (5)에 (3)의 \mathbf{n}_i 요소들을 대입하므로써 반사 행렬 \mathbf{M}_{oi} 를 구할 수 있고, 이에 원뿔 거울에서 반사되는 광로 \mathbf{P}_o 에 대한 단위 광 방향 벡터 \mathbf{u}_o 를 다음과 같이 구할 수 있다

$$\mathbf{u}_o = \mathbf{M}_{oi} \cdot \mathbf{u}_i \quad (6)$$

여기서 \mathbf{P}_i 에 대한 단위 광 방향 벡터

$$\mathbf{u}_i = [u_{ix}, u_{iy}, u_{iz}]^T = [\sin\phi, \cos\theta_i, \sin\phi \sin\theta_i, \cos\phi_i]^T.$$

그러므로, 원뿔 거울의 반사점으로 부터 측정코자 하는 물체에의 한 점까지의 광로 \mathbf{P}_o 는 다음과 같다

$$\mathbf{P}_o = d_o \cdot \mathbf{u}_o. \quad (7)$$

또한 원뿔 거울의 반사점에 대한 레터럴 벡터 \mathbf{l}_c 의 z 값은 다음과 같이 구해진다

$$\mathbf{P}_i = {}^i\mathbf{T}_c \mathbf{l}_c \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} d_i u_{ix} \\ d_i u_{iy} \\ d_i u_{iz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^i\mathbf{R}_{xx} & {}^i\mathbf{R}_{xy} & {}^i\mathbf{R}_{xz} & {}^i\mathbf{t}_x \\ {}^i\mathbf{R}_{yx} & {}^i\mathbf{R}_{yy} & {}^i\mathbf{R}_{yz} & {}^i\mathbf{t}_y \\ {}^i\mathbf{R}_{zx} & {}^i\mathbf{R}_{zy} & {}^i\mathbf{R}_{zz} & {}^i\mathbf{t}_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z \tan(\alpha/2) \cos\theta_c \\ z \tan(\alpha/2) \sin\theta_c \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$z = \frac{\tan(\alpha/2)[\cos\theta_c(u_{ix} {}^i\mathbf{R}_{yx} - u_{iy} {}^i\mathbf{R}_{xx}) + \sin\theta_c(u_{ix} {}^i\mathbf{R}_{yy} - u_{iy} {}^i\mathbf{R}_{yz})] + u_{ix} {}^i\mathbf{R}_{yz} - u_{iy} {}^i\mathbf{R}_{xz}}{u_{iy} {}^i\mathbf{t}_x - u_{ix} {}^i\mathbf{t}_y} \quad (10)$$

더불어 레이저 띠의 광로 \mathbf{P}_L 은

$$\mathbf{P}_L = d_L \mathbf{u}_L \quad (11)$$

여기서 \mathbf{P}_L 에 대한 단위 광 방향 벡터

$$\mathbf{u}_L = [u_{Lx}, u_{Ly}, u_{Lz}]^T = [\sin\phi_L \cos\theta_L, \sin\phi_L \sin\theta_L, \cos\phi_L]^T.$$

따라서 그림 3에서 알 수 있듯이 측정코자 하는 물체에의 한 점은 광로 \mathbf{P}_c 과 \mathbf{P}_L 의 교점이다. 그러므로, 광로 \mathbf{P}_L 에 대한 크기 매개변수 d_L 은 다음과 같이 유도될 수 있다

$$\begin{aligned}\mathbf{P}_L &= {}^L\mathbf{T}_c \mathbf{P}_c \\ &= {}^L\mathbf{T}_c (\mathbf{P}_o + \mathbf{l}_c)\end{aligned}\quad (12)$$

$$\begin{bmatrix} d_L u_{Lx} \\ d_L u_{Ly} \\ d_L u_{Lz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^L R_{xx} & {}^L R_{xy} & {}^L R_{xz} & {}^L t_x \\ {}^L R_{yx} & {}^L R_{yy} & {}^L R_{yz} & {}^L t_y \\ {}^L R_{zx} & {}^L R_{zy} & {}^L R_{zz} & {}^L t_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_o u_{ox} + z \tan(\alpha/2) \cos \theta_c \\ d_o u_{oy} + z \tan(\alpha/2) \sin \theta_c \\ d_o u_{oz} + z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$d_L = \frac{A_L C_L - B_L D_L}{A_L u_{Lx} - B_L u_{Ly}} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \text{여기서 } A_L &= {}^L R_{yx} u_{ox} + {}^L R_{yy} u_{oy} + {}^L R_{yz} u_{oz} \\ B_L &= {}^L R_{xx} u_{ox} + {}^L R_{xy} u_{oy} + {}^L R_{xz} u_{oz} \\ C_L &= {}^L R_{xx} z \tan(\alpha/2) \cos \theta_c + {}^L R_{xy} z \tan(\alpha/2) \sin \theta_c + {}^L R_{xz} z + {}^L t_x \\ D_L &= {}^L R_{yx} z \tan(\alpha/2) \cos \theta_c + {}^L R_{yy} z \tan(\alpha/2) \sin \theta_c + {}^L R_{yz} z + {}^L t_y. \end{aligned}$$

또한, ${}^L\mathbf{T}_c$ 는 원뿔 거울 좌표계 {c}에 대한 레이저 좌표계 {L}의 동차 행렬(homogeneous matrix)이다[22].

결론적으로 이동로봇의 좌표계로 부터 측정코자 하는 물체에의 한 점까지의 거리 \mathbf{P}_m 은 다음과 같이 구해진다

$$\mathbf{P}_m = {}^m\mathbf{T}_L \mathbf{P}_c. \quad (15)$$

여기서 ${}^m\mathbf{T}_L$ 은 레이저 좌표계 {L}에 대한 이동로봇 좌표계 {m}의 동차 행렬이다.

그러나, 이동로봇이 자율 주행 시에는 절대 좌표에서의 주변 환경의 거리 정보가 필요하고 이를 위해서는 절대 좌표계(world coordinates)에서의 측정코자 하는 물체까지의 거리를 구할 필요가 있다. 이에 절대 좌표계(world coordinates)로 부터 측정코자 하는 물체에의 한 점까지의 거리 \mathbf{P}_w 는 다음과 같이 구해진다

$$\mathbf{P}_w = {}^w\mathbf{T}_m \mathbf{P}_m. \quad (16)$$

여기서 ${}^w\mathbf{T}_m$ 은 이동로봇의 상대 좌표계 {m}에 대한 절대 좌표계 {w}의 동차 행렬이다.

따라서 (16)에 의해 실제 측정코자 하는 물체까지의 한 점에 대한 거리를 알아낼 수 있다. 이에 포착된 영상에서 각각의 방위각에 대응하는 픽셀을 구해내고 동일한 방법으로 거리를 측정하므로써 한번의 영상 포착으로 전(全)방향에 대한 2차원 거리 정보를 계산해 낸다. 이때, 이동로봇의 이동 및 회전을 나타내는 자세 정보는 자기 위치 보정 작업에 의해 구하면 된다.

3. 센서 시스템 설계

그림 4는 이동로봇의 기준 직교 좌표계에서의 제안된 센서 시스템에 대한 기구 구성도를 나타낸 것이다. 주변 환경에 대한 거리 측정 계산을 쉽게 하기 위해 레이저 광원과 원뿔 거울의 중심 및 CCD 카메라의 중심은 모두 이동로봇 기준 좌표계의 Z축 선상에 존재하도록 설계하였다.

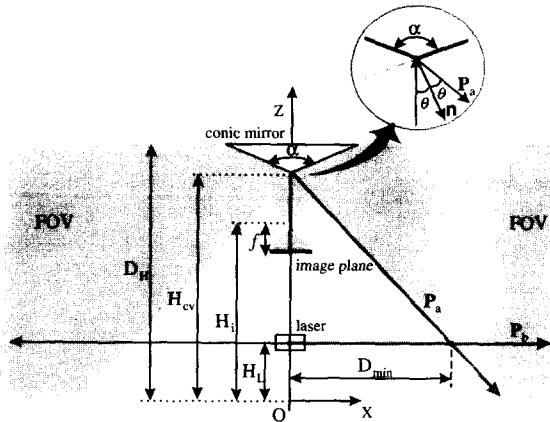


그림 4. 제안된 센서 시스템의 기구학적 구성.

Fig. 4. Geometric configuration of the sensor system.

즉, 동차 행렬 ${}^i\mathbf{T}_c$, ${}^L\mathbf{T}_i$ 와 ${}^m\mathbf{T}_L$ 은 다음과 같다

$${}^i\mathbf{T}_c = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & H_{ci} - H_i \end{bmatrix}, {}^L\mathbf{T}_i = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & H_i - H_L \end{bmatrix}, {}^m\mathbf{T}_L = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & H_i \end{bmatrix} \quad (17)$$

또한, 이동로봇 기준 좌표계의 원점에서 레이저 광원까지의 거리는 H_L 로, CCD 카메라의 촛점 위치까지의 거리는 H_i 로, 원뿔 거울의 꼭지점까지의 거리는 H_{cv} 로 표현하였다. 이에 제안된 센서 시스템을 이동로봇의 자율 주행에 이용하기 위해서 고려해야 하는 몇 가지 중요한 설계 조건 제시하고자 한다. 첫째, 레이저에 관한 것으로 주사되는 레이저에 대한 안전성을 확보하기 위해 레이저의 위치는 낮을수록 좋은데, 본 연구에서는 기구적인 설계 제약을 고려하여 레이저 위치인 H_L 값을 390 mm로 결정하였다. 또한, 이동로봇이 자율 주행시 가능한 한 먼 거리까지 장애물의 유무를 알 수 있으면 좋으므로 그림 4에서 알 수 있듯이 2차원 거리 정보만을 추출하는 경우에는 레이저 광원이 실험 장소의 표면과 평행하게 주사되도록 설정하였다. 둘째로는 유효 측정 가능 영역(effective measurable region)에 관한 것으로 그림 4에서 알 수 있듯이 높이 방향으로 측정 가능한 영역을 이동로봇의 높이와 일치하도록 설계하였다. 더 높은 영역까지 측정하고자 한다면 원뿔 거울을 더 높게 설치하거나 원뿔 거울의 꼭지점각(vertex angle)을 더 작게 설계하면 되는데, 그러한 경우에는 거리 방향으로의 최소 측정 가능 거리는 커지게 된다는 것을 고려해야 한다. 이에 본 연구에서는 측정 가능한 높이를 결정하는 매개변수인 원뿔 거울 꼭지점 까지 거리인 H_{cv} 를 기구적인 설계의 균형을 고려하여 640mm로 결정하였고, 이에 측정 가능한 최대 높이는 681mm이다. 거리 방향으로는 상기의 설계 기준에 의해 이론적으로는 무한대의 거리까지 측정이 가능하나 레이저 광원의 광량에 따라 CCD 카메라에 검지될 수 있는 거리의 한계가 있다. 현재 사용 중인 다이오드 레이저(634nm, 12mW)를 고려하여 전(全)방향에 대한 장애물 검지가 가능한 측정 거리 영역

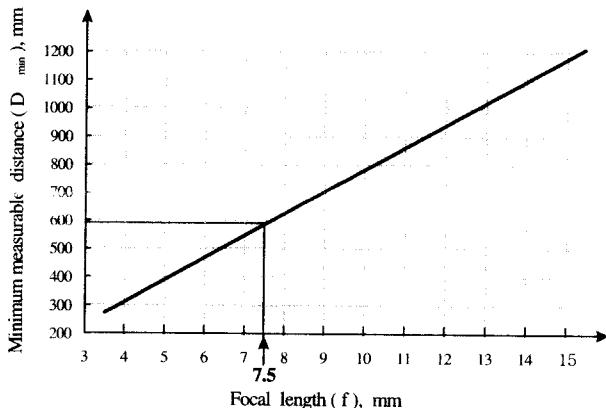


그림 5. 촛점 거리에 따른 측정 가능 최소 거리.

Fig. 5. Minimum measurable distance vs. focal length.

을 0.6m~3m로 결정하였는데, 이는 이동로봇이 장애물을 검지하고 이에 대응하는데 충분한 시간적 여유를 가질 수 있는 거리라고 판단하였다.

그러면 상기의 설계 조건에 의해 시스템의 설계 변수를 결정하고자 한다. CCD 카메라의 촛점 거리인 f 가 결정되고, CCD 셀 크기가 L 이라면 영상면(image plane)에서의 최대 천정각 $\phi_{i(\max)}$ 는

$$\phi_{i(\max)} = \tan^{-1}\left(\frac{L/2}{f}\right) \quad (18)$$

이 되고, 이에 따라 설정한 FOV(field of view)를 만족하기 위한 원뿔 거울의 꼭지점 각도인 α 는 다음식에 의해 유일하게 결정된다

$$\alpha = \phi_{i(\max)} + 90^\circ. \quad (19)$$

이에 촛점 거리 f 에 따른 측정 가능한 최소 거리 D_{\min} 를 계산하기 위해 다음과 같은 두 직선 방정식을 구하고

$$\gamma = 90^\circ - \frac{\alpha}{2} \quad (20)$$

$$P_a : z = -\tan(90^\circ - 2\gamma)x + H_{cv} = -\tan(\alpha - 90^\circ)x + H_{cv} \quad (21)$$

$$P_b : z = H_L \quad (22)$$

그 두 직선의 교점이 측정 가능한 최소 거리 D_{\min} 이 된다.

$$D_{\min} = \frac{H_{cv} - H_L}{\tan(\alpha - 90^\circ)} \quad (23)$$

그림 5는 1/2" CCD 카메라를 사용했을 때 구해진 촛점 거리(focal length)에 따른 측정 가능한 최소 거리에 대한 값을 나타낸 것이다. 이에 상기의 설계 기준의 측정 가능한 영역을 만족시켜 줄 수 있는 촛점 거리로써 상품화되어 있는 7.5mm를 선정하였고, (19), (23)에 의해 센서 시스템의 원뿔 거울의 꼭지점 각도인 α 는 113°이며, 측정 가능한 최소 거리인 D_{\min} 값은 586mm가 된다.

4. 센서 시스템 보정

제안된 센서 시스템의 구조를 결정하는 매개변수 중

표 1. 시스템 매개변수 H_i 보정 결과.Table 1. Calibration results of the system parameter H_i .

(x,y,z), m	(1.0, 0, 0.39)	(1.0, 1.0, 0.39)	(0, -1.0, 0.39)
value, mm	533.4	532.8	535.7
(x,y,z), m	(-1.0, -1.0, 0.39)	(1.5, 0, 0.39)	(1.5, 1.5, 0.39)
value, mm	532.9	534.4	534.9
(x,y,z), m	(0, -1.5, 0.39)	(-1.5, -1.5, 0.39)	(2.0, 0, 0.39)
value, mm	536.1	534.6	536.1
(x,y,z), m	(2.0, 2.0, 0.39)	(0, -2.0, 0.39)	(-2.0, -2.0, 0.39)
value, mm	533.9	539.2	537.1
Mean, mm		535.09	
Standard deviation (σ)		1.8686	

제작 후 직접 그 크기를 쟈 수 없는 변수는 CCD 카메라 촛점까지의 높이인 H_i 이다. 이에 알고 있는 기준점 $P_o = [x_o, y_o, z_o]^T$ 에 레이저를 주사하고 CCD에 입력된 영상을 통해 (6), (14), (15), (17)에 의해 H_i 값을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$H_i = \left[\frac{x_o \cdot K_u}{\sin \phi_L \cos \theta_L} - H_L \cdot K_x \right] K_c - H_{cv} \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cos \theta_c \cdot K_b \quad (24)$$

여기서 α = 원뿔 거울의 꼭지각

$$H_L = \text{원점에서 레이저 소스까지의 거리}$$

$$H_{cv} = \text{원점에서 원뿔 거울의 꼭지각까지의 거리}$$

$$\theta_i = \text{이미지면 좌표계에서의 방위각}$$

$$\theta_L = \text{레이저 소스 좌표계에서의 방위각}$$

$$\theta_c = \text{원뿔 거울 좌표계에서의 방위각}$$

$$\phi_i = \text{이미지면 좌표계에서의 천정각}$$

$$\phi_L = \text{레이저 소스 좌표계에서의 천정각}$$

$$M_{xx} = 1 + \tan^2(\alpha/2) - 2 \cos^2 \theta_c, M_{xy} = 2 \cos \theta_c \sin \theta_c$$

$$M_{xz} = M_{xx} = 2 \cos \theta_c \tan(\alpha/2), M_{yz} = -2 \sin \theta_c \tan(\alpha/2)$$

$$M_{zz} = 1 - \tan^2(\alpha/2)$$

$$K_1 = \frac{1}{1 + \tan^2(\alpha/2)} [M_{xx} \sin \phi_i \cos \theta_i + M_{xy} \sin \phi_i \sin \theta_i + M_{xz} \cos \phi_i]$$

$$K_2 = \frac{1}{1 + \tan^2(\alpha/2)} [M_{xz} \sin \phi_i \cos \theta_i + M_{yz} \sin \phi_i \sin \theta_i + M_{zz} \cos \phi_i]$$

$$K_a = \cos \phi_L K_1 - \sin \phi_L \cos \theta_L K_2, K_b = \cos \phi_i K_1 - \sin \phi_i \cos \theta_i K_2$$

$$K_c = \cos \phi_i \tan(\alpha/2) \cos \theta_c - \sin \phi_i \cos \theta_i.$$

하나의 기준점만을 가지고도 H_i 를 구할 수 있으나 그 정확도를 높이기 위해 90°간격으로 3점(1m, 1.5m, 2m) 씩 12개의 기준점들을 이용하여 H_i 값을 구하였다. 레이저 범의 천정각 ϕ_L 은 90°로 설정하였다. 표 1은 보정 결과를 보여주고 있으며, 이에 H_i 의 평균값은 535.1mm 이었다. 더불어 보정된 시스템 매개 변수의 오차를 분석하여 위하여 본 센서 시스템의 측정 분해능과 실제 측정을 수행하여 얻은 거리 측정 오차를 비교해 보았다.

5. 센서 시스템의 측정 분해능

그러면 상기에서 결정된 시스템의 설계 변수들을 가

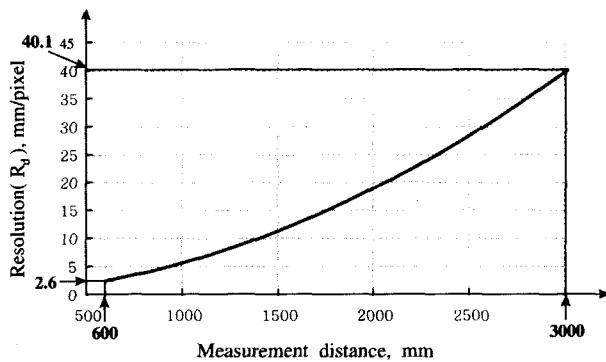


그림 6. 센서 시스템의 측정 분해능.

Fig. 6. Simulation results of measurement resolution.

지금 제안된 센서 시스템의 거리 측정 센서인 CCD 영상에서의 거리 측정 분해능 값인 R_d 를 계산해 보고자 한다. CCD 카메라에 의해 포착된 영상은 640 X 480 픽셀 모드로 변환된다고 가정한다. 이에 픽셀간의 실제 거리 값인 ΔP 는 다음과 같이 구해질 수 있다.

$$\Delta P = \frac{L}{640} (\text{mm/pixel}) \quad (25)$$

여기서 L은 CCD 카메라의 셀 크기이다.

이에 이미지 중심에서 k pixel 만큼 떨어져 있는 곳에 서의 천정각 $\phi_i(k)$ 는

$$\phi_i(k) = \tan^{-1}\left(\frac{\Delta P \cdot k}{f}\right) \quad (26)$$

이 된다. 따라서 (2)-(15)에 의해 측정된 위치인 $P_o(k)$ 를 구할 수 있고, 그 값에 의해 각 픽셀간의 거리 분해능 값인 R_d 는 다음과 같이 구할 수 있다

$$R_d = P_o(k+1) - P_o(k). \quad (27)$$

본 센서 시스템은 레이저 광원의 천정각에 따라 거리 측정 분해능이 변하게 되어 있다. 그러나 이동로봇이 자율 주행시 2차원 거리 정보만을 추출하는 경우가 대부분이고, 그러한 경우에 가능한 한 먼 거리까지의 장애물을 검지할 수 있도록 하기 위해 레이저 광원이 실험 장소의 표면과 평행하게 주사되도록 하고 있다. 즉, 천정각 ϕ_L 은 90° 가 된다. 이에 그림 6은 ϕ_L 이 90° 인 경우에 유효 측정 거리 영역에서의 R_d 값의 변화를 보여 주는 것인데 그 거리 분해능 값의 범위는 2.6mm~40.1mm이다. 즉, 불연속적인 픽셀간의 측정 오차가 최대 측정거리(3m)에서 약 40mm인데, 이 정도의 오차는 이동로봇이 정상적으로 자율 주행하는데 무리가 없는 허용 거리 오차라고 생각한다.

6. 센서 시스템의 거리 측정 오차

다음으로 제작된 센서 시스템의 거리 측정 정밀도를 알아보기 위한 실험이 수행되었다. 즉, 측정 가능 유효 거리 내에서 100mm 간격으로 25 개의 기준점이 설정되었고, 레이저 빔의 천정각 ϕ_L 은 상기의 모의실험 조건과 동일한 90° 로 설정하였다. 또한 본 센서 시스템의 거리

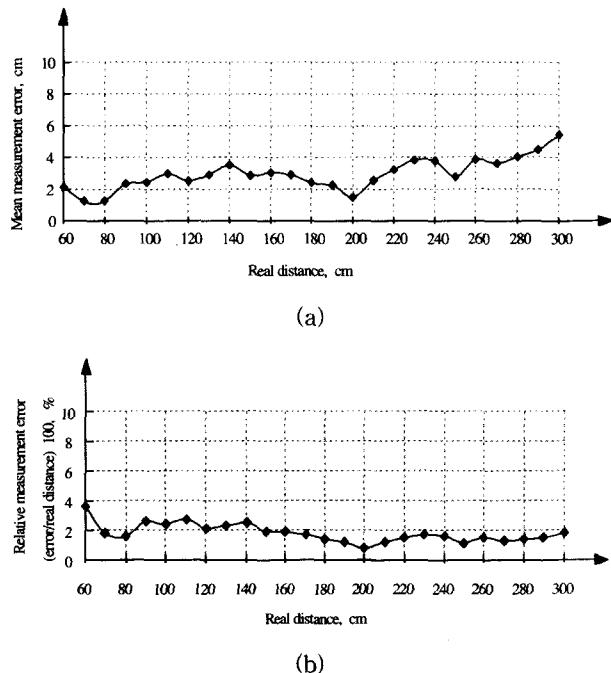


그림 7. 제안된 센서 시스템의 거리 측정 오차. (a) 거리에 따른 측정 오차의 실험 결과, (b) 거리에 따른 상대 측정 오차의 실험 결과.

Fig. 7. Measurement error of the proposed sensor system. (a) Experimental results of measurement error vs. real distance, (b) Experimental results of relative measurement error vs. real distance.

측정 반복도를 평가하기 위해 실험은 10번씩 반복되었다. 이에 그림 7(a)는 실제 거리에 대한 측정 오차를, 그림 7(b)는 거리에 따른 상대 측정 오차를 보여준다. 표 2에서 알 수 있듯이 본 센서 시스템의 거리 측정 오차의 평균값은 30.1mm이고 최대값은 96.0mm이며, 실제 거리에 대한 측정 오차의 백분율은 1.74%이었다. 또한, 거리 측정 오차는 12.5mm에서 54.5mm 사이에서 변화한다. 더불어 그림 6의 모의실험 결과와 마찬가지로 측정코자 하는 물체의 거리가 멀어질수록 그 거리 측정 오차는 더욱 커짐을 알 수 있다. 이때 본 센서 시스템의 거리 측정 오차를 야기시키는 요인이 센서 시스템의 측정 분해능과 시스템 변수 보정 오차에 의한 것이라 가정하고 실험으로 얻어진 상기의 거리 측정 오차 범위에 대해 본 센서 시스템의 측정 분해능의 범위를 빼면 9.9mm-14.4mm의 측정 오차 범위가 도출되고 이 측정 오차는 시스템 변수 보정 오차에 의한 것이라 간주 할 수 있다. 결론적으로 본 센서 시스템은 유효 측정 거리 영역내에서 약 30.1mm의 측정 오차가 발생한다는 것을 알 수 있고, 이 측정 오차는 본 센서 시스템이 이동로봇에 적용된다 는 관점에서 볼 때 고려되어 질 수 있는 측정 오차라 사려 된다. 또한 CCD 카메라 촬영까지의 높이인 H 값이 (24)로부터 주어지므로 그림 4와 같은 기하학적 관계에 의해 측정 가능한 물체의 최대 높이 D_H 는 다음과 같은 식에 의해 구해지며, 그 값은 681mm이다

표 2. 제안된 센서 시스템의 거리 측정 정도 분석을 위한 실험 결과.

Table 2. Experimental results for measurement accuracy of the proposed sensor system.

real distance (mm)	mean error (mm)	max. error (mm)	error/distance x100 (%)
600	21.3	34.4	3.55
700	12.5	31.5	1.79
800	12.8	30.7	1.60
900	23.5	49.0	2.61
1000	24.4	44.5	2.44
1100	29.8	49.0	2.71
1200	25.3	46.0	2.10
1300	29.4	50.0	2.26
1400	35.4	57.6	2.53
1500	28.7	52.8	1.92
1600	30.6	57.0	1.91
1700	29.2	49.8	1.72
1800	24.4	48.6	1.35
1900	22.9	59.4	1.21
2000	15.1	39.0	0.76
2100	25.8	44.1	1.23
2200	32.6	60.2	1.48
2300	38.6	57.4	1.68
2400	38.2	79.2	1.59
2500	27.8	72.0	1.11
2600	38.9	68.0	1.50
2700	36.4	64.4	1.35
2800	40.5	69.3	1.45
2900	44.8	67.6	1.54
3000	54.6	96.0	1.82
Total mean	30.1	-	1.74
σ	9.86	-	-
σ^2	97.20	-	-

$$D_H = \left[\frac{H_{cv} - H_i}{(2f/L) - \tan(90^\circ - \alpha/2)} \right] \frac{f}{L/2} + H_i. \quad (28)$$

이러한 사양을 만족시키는 이동로봇 자율 주행용으로 제작된 센서 시스템의 최종적인 사양은 표 3과 같다.

III. 실험 결과

제안된 센서 시스템의 성능을 평가하기 위해 이동로봇의 자율 주행을 위한 2차원 거리 정보를 구하여 보았다. 이때 원뿔 거울을 통해 포착되는 영상의 잡음을 줄이기 위해 CCD 카메라 앞에 630nm 밴드 패스 필터를 부착하였다. 레이저 광원의 천정각 ϕ_L 은 90° 로 설정하였다. 그림 8(a)는 실험한 장소로써 여러 형태의 장애물들이 산재해 있고, 열려 있거나 닫혀있는 문들이 존재하는 복도이다. 그림 8(b)는 레이저 점 광원을 회전시킴에 의해 형성된 레이저 빔을 원뿔 거울을 거쳐 CCD 카메라로 읽어 들이고 그 이미지를 이진화한 영상이며, 이진화 값은 20이다. 영상에 나타나는 라인들은 여러 픽셀들로 이루어져 있으므로 거리 계산을 위해서는 각 방위각마다 유일한 픽셀을 선택하는 작업이 필요하다. 본 논문에서는 특정 방위각에 포함되는 여러 픽셀들에 대해 영상의 중심점에 대한 무게 중심법을 이용하여 기준이 되는 하나의 픽셀을 선택하였다. 또한 그림 8(c)는 실험 장소의

표 3. 제작된 센서 시스템의 사양.

Table 3. Specifications of the implemented sensor system.

ITEM	SPECIFICATION
Diode laser	634nm, 12mW (Power Tech.)
Conic mirror	vertex angle(α) = 113° , $H = 60\text{mm}$
CCD camera	1/2 (SONY)
Band-pass filter	630nm
Focal length	7.5mm
Effective measurable height	0mm-681mm
Effective measurable distance	0.6m-3m
Resolution of distance	12.5mm-54.5mm
Distance between floor and laser (H_L)	390.0mm
Distance between floor and lens center (H_i)	535.1mm
Distance between floor and vertex of conic mirror (H_{cv})	640.0mm
Laser rotating speed	over 1800rpm
Resolution of laser swing angle	0.2°

실제 거리와 센서 시스템에 의해 측정된 거리 데이터를 함께 보여주고 있다. 그림 8(d)는 상기의 실험 결과를 실제 거리에 대한 측정된 거리의 관계로 나타낸 경우이다. 그림에 표현한 직선 가까이에 그 실험 결과 데이터가 밀집하고 있고 이는 본 센서 시스템의 측정 정도가 높다는 결론을 내릴 수 있게 해준다. 좀더 상세한 오차 분석을 위해 그림 8(e)와 같이 실제 거리에 따른 측정 오차 (실제 거리 값 - 측정된 거리 값)을 도시해 보았다. 결과적으로 이동로봇을 중심으로 약 3m 반경을 갖는 영역 내에서의 평균 거리 측정 오차는 21.3mm이고 최대 측정 오차가 78.0mm이었다. 더불어 그림 8(e)의 결과에 의해 측정코자 하는 거리가 멀수록 그 측정 오차가 커지는 것을 알 수 있는데 이는 모의실험에 의해 보여준 그림 6의 측정 거리 분해능에 대한 결과와 일치함을 알 수 있다. 이에 그 측정 오차의 원인에 대해 분석해 보면 다음과 같다.

첫째, 그림 8(b)의 영상에서 거리 데이터들을 구해내기 위해서는 각 방위각에 대응하는 하나의 픽셀 점을 추출해야 하는데, 이러한 영상 전처리 과정에서 1-2 픽셀의 오차가 발생할 수 있다. 둘째, 실험하는 장소의 표면이 고르지 못하면 주사되는 레이저 빔의 각도에 대한 오차로 인해 실제 측정한 거리의 오차는 더욱 커지게 된다. 세째, 그림 8(b)와 같이 원뿔 거울을 통해 포착된 영상을 처리하여 주변 환경에 대한 거리를 측정하는데 현재 사용하고 있는 거리 측정 알고리즘에서는 방위각을 0.5° 간격으로 균등하게 분할하여 각각의 방위각으로의 하나의 픽셀 점을 찾아 삼각 측정법에 의해 그 거리를 계산한다. 그러나 영상에서의 픽셀들은 불연속적으로 분포되어 있어서 실제 방위각과의 오차가 발생할 수 있다.

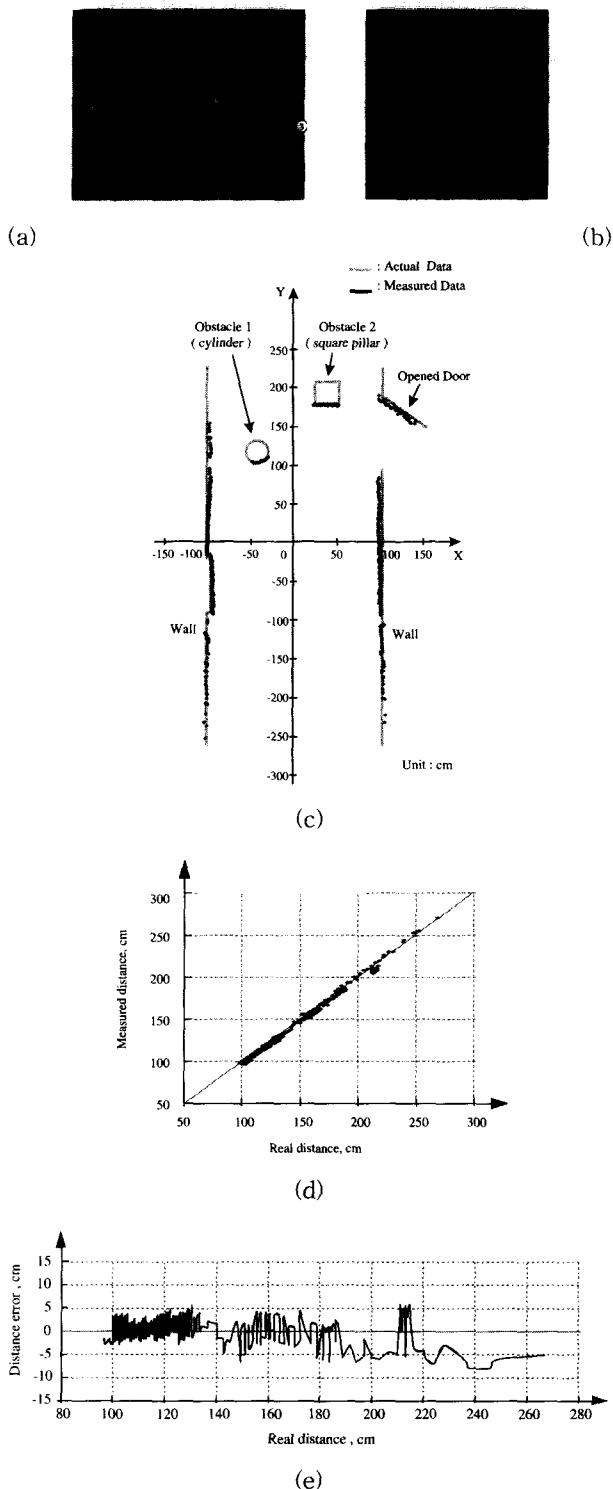


그림 8. 주변환경에 대한 2차원 거리 측정 결과. (a) 실험환경, (b) 포착된 영상, (c) 2차원 거리 측정 결과, (d) 실제 거리에 대한 거리 측정값, (e) 실제 거리에 대한 거리 측정 오차.

Fig. 8. Experimental results of two-dimensional depth data measurement. (a) the environment, (b) captured image, (c) measured two-dimensional depth data, (d) real distance vs. measured distance, (e) real distance vs. measurement error.

상기와 같은 여러 가지의 측정 오차 원인이 있음에도 불구하고 본 실험에서 얻어진 주변 환경에 대한 거리 측정 정보들은 이동로봇이 주변 환경을 인식하며 자율 주행하는데 무리가 없는 정밀도를 갖는다고 사려된다. 또한, 본 센서 시스템의 거리 측정 속도에 대한 성능을 검토하기 위해 전방향에 대한 2차원 거리 정보를 구하는 거리 측정 과정을 100회 반복하여 그 평균값을 계산해 보았더니 그 값은 85.4msec이었다.

IV. 결론

본 논문에서는 이동로봇의 원활한 자율 주행을 위해 실시간으로 장애물을 감지할 수 있고, 보다 넓은 측정 영역을 가지며 그 측정 정밀도도 높은 새로운 이동로봇용 센서 시스템을 개발코자 하였다. 이를 위해 원뿔 거울과 CCD 카메라 및 원뿔형 레이저면을 이용한 전방향 능동 거리 센서 시스템이 제안되었다. 이에 거리 측정에 대한 원리와 센서 시스템 설계 기준 및 시스템 매개 변수 보정 방법 및 결과에 대해서 논하였다. 또한 제안된 센서 시스템의 측정 분해능과 실제 거리 측정 오차에 대해서도 논하였다. 더불어 실제 환경에 적용시 그 성능을 평가하기 위해 이동로봇의 자율 주행을 위한 2차원 거리 정보를 구하는 실험을 수행하였다. 결론적으로 본 센서 시스템은 유효 측정 영역에서 평균 30.1mm의 측정 오차가 발생하는데 이 정도의 거리 측정 오차는 이동로봇에 적용된다면 관점에서 허용 가능한 거리 측정 오차라 사려 된다. 또한 본 센서 시스템의 2차원 거리 측정 평균 시간은 85.4msec로써, 이는 전(全)방향에 대한 2차원 거리 정보를 측정해내는데 걸리는 시간이 100msec 이하로 거의 실시간에 가깝다는 것을 알 수 있다. 향후에는 더욱 향상된 거리 측정 알고리즘 개발과 시스템 설계를 통해 본 센서 시스템의 측정 정밀도를 높이고자 한다. 또한 제안된 센서 시스템에 의해 측정된 2차원 거리 정보를 이용하여 주변환경에 대한 사전 정보없이 이동로봇의 현 위치와 자세를 추정하는 자기위치 추정 알고리즘 개발이 진행 중이다.

참고문헌

- [1] C. Thorpe, M. H. Hebert, T. Kanade and S. A. Shafer, "Vision and navigation for the Carnegie-Mellon Navlab," *IEEE Trans. PAMI*, vol. 10, no. 3, pp. 362-373, 1988.
- [2] U. R. Dhond and J. K. Aggarwal, "Structure from stereo - A review," *IEEE Trans. Systems, Man and Cybernetics*, vol. 19, no. 6, pp. 1489-1510, 1989.
- [3] J. C. Fiala, R. Lumia, K. J. Roberts and A. J. Wavering, "TRICLOPS: A tool for studying active vision," *Int. Journal of Computer Vision*, pp. 231-250, 1994.
- [4] A. D. Bimbo, L. Landi and S. Santini, "Determination of road directions using feedback neural nets," *Signal Processing* 32, pp. 140-160, 1993.

- [5] M. A. Turk, D. G. Morgenthaler, K. D. Gremban and M. Marra, "VITS - A vision system for autonomous land vehicle navigation," *IEEE Trans. PAMI*, vol. 10, no. 3, pp. 342-361, 1988.
- [6] P. Kahn, L. Kitchen and E. M. Riseman, "A fast line finder for vision guided robot navigation," *IEEE Trans. PAMI*, vol. 12, no. 11, pp. 1098-1102, 1990.
- [7] A. Elfes, "Sonar-based real world mapping and navigation," *IEEE Journal of Robotics and Automation*, vol. RA-3, no. 3, pp. 249-265, 1987.
- [8] H. R. Beom and H. S. Cho, "A sensor-based navigation for a mobile robot using fuzzy logic and reinforcement learning," *IEEE Trans. Systems, Man and Cybernetics*, vol. 25, no. 3, pp. 464-477, 1995.
- [9] F. G. Pin and 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.
- [10] M. Buchberger, K. W. Jorg and E. Puttkamer, "Laserradar and sonar based world modeling and motion control for fast obstacle avoidance of the autonomous mobile robot MOBOT-IV," *IEEE Int. Conf. on Robotics & Automation*, pp. 534-540, 1993.
- [11] M. G. Slack, "Fixed computation real-time sonar fusion for local navigation," *IEEE Int. Conf. on Robotics & Automation*, pp. 123-129, 1993.
- [12] H. Peremans and J. V. Campenhout, "Tri-aural perception on a mobile robot," *IEEE Int. Conf. on Robotics & Automation*, pp. 265-270, 1993.
- [13] E. Freund and F. Dierks, "Laser scanner based free navigation of autonomous vehicles," *Control Engineering Practice*, vol. 2, no. 2, pp. 299-304, 1994.
- [14] G. L. Miller and E. R. Wagner, "An optical rangefinder for autonomous robot cart navigation," *Proc. of SPIE MobileRobots II*, vol. 852, pp. 132-144, 1987.
- [15] H. Ishiguro, M. Yamamoto and S. Tsuji, "Omni directional stereo for making global map," *Proc. of 3rd Int. Conf. Computer Vision*, 1990.
- [16] Y. Yagi, S. Kawato and S. Tsuji, "Real-time omni directional image sensor (COPIS) for vision-guide navigation," *IEEE Trans. Robotics & Automation*, vol. 10, no. 1, pp. 11-22, 1994.
- [17] Y. Yagi, Y. Nishizawa and M. Yachida, "Map-based navigation for mobile robot with omnidirectional image sensor (COPIS)," *IEEE Trans. Robotics & Automation*, vol. 11, no. 5, pp. 634-647, 1995.
- [18] J. Hong, X. Tan, B. Pinette, R. Weiss and E. M. Riseman, "Image based homing," *Proc. of Int. Conf. Robotics & Automation*, pp. 620-625, 1991.
- [19] K. Yamazawa, Y. Yagi and M. Yachida, "Obstacle detection with omnidirectional image sensor hyperomni vision," *IEEE Int. Conf. on Robotics & Automation*, pp. 1062-1067, 1995.
- [20] Z. L. Cao, S. J. Oh and E. L. Hall, "Dynamic omni directional vision for mobile robots," *J. Robotic Systems*, vol. 3, no. 1, pp. 5-17, 1986.
- [21] 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.
- [22] J. Craig, *Introduction to Robotics*, Addison Wesley, pp. 16-25, 1986.
- [23] R. Kingslake, *Applied Optics and Optical Engineering*, Academic Press, pp. 284-296, 1965.

정 인 수

1964년생. 1988년 고려대학교 기계공학과(공학사). 1990년 한국과학기술원 생산공학과(공학석사). 1998년 한국과학기술원 자동화 및 설계공학과(공학박사). 1999년-현재 에스원주기술연구소 근무. 관심분야는 이동로봇, 마이크로 프로세서 응용, 지능제어.

조 형 석

1944년생. 1971년 서울대학교 공업교육학과(공학사). 1973년 Uni. Of Northwestern 기계공학과(공학석사). 1977년 Uni. Of California at Berkeley(공학박사). 1978년-현재 한국과학기술원 기계공학과 교수. 1990년-1993년 IFAC Manufacturing Committee의 부회장. 현재 국제 Journal인 Robotica, Control Engineering Practice와 Advanced Robotics의 편집위원. 관심분야는 인공지능응용, 비전시스템, 공정제어, 로보틱스, 조립자동화.