

초음파 센서와 실린더형 등대를 이용한 이동 로봇의 위치 추정

범희락* 조형석**

* 금성산전 연구소 ** 한국과학 기술원 정밀공학과

The Mobile Robot Localization Using a Single Sonar and Cylindrical Beacon

Hee Rak Beom* and Hyung Suck Cho**

* Research & Development Laboratory Gold Star Industrial Systems, CO., Ltd. Anyang, Korea.

** Department of Precision Engineering and Mechatronics Korea Advanced Institute of Science and Technology 373-1 Kusong-dong, Yusong-gu, Taejeon, 305-701, Korea.

ABSTRACT: This paper proposes a new method of estimating the position and heading angle of a mobile robot moving on a flat surface. The proposed localization method utilizes two passive beacons and a single rotating ultrasonic sensor. The passive beacons consist of two cylinders with different diameters and reflect the ultrasonic pulses coming from the sonar sensor mounted on the mobile robot. The geometric parameter set of beacon is acquired from the sonar scan data obtained at a single mobile robot location using a new data processing algorithm. From this parameter set, the position and heading angle of the mobile robot is determined directly. The performance and validity of the proposed method are evaluated using two beacons and a single sonar sensor attached at the pan-tilt device mounted on a mobile robot, named LCAR, in our laboratory.

1. 서론

초음파 센서는 값이 싸고 처리시간이 빠르기 때문에 로봇분야에 많이 사용되고 있다. 초음파 센서 사용 분야는 로봇 주위의 장애물을 감지하는 분야, 감지된 데이터로부터 지도를 만드는 분야와 이동로봇의 절대 위치 추정분야에 사용되고 있다.

절대위치 추정방법은 휠엔코더를 이용하는 사산법(Dead Reckoning) [1], 관성 항법계, 카메라와 랜드마크 [2]를 사용하는 방법 그리고 등대를 이용하는 방법 [3]이 있다. 사산법은 이동로봇의 미소 운동량을 시간에 대하여 적분함으로써 로봇의 현재 위치와 방향을 추정할 수 있는 방법이다. 그러나 로봇의 주행거리가 증가하거나 바퀴와 바닥면 사이에 미끄러짐이 발생하는 경우 큰 오차를 유발한다. 최근에 카메라와 랜드마크를 이용하는 방법이 많이 연구되고 있다. 이 방법은 특히 계산시간을 줄이기 위하여 랜드마크를 단순한 형태로 설계하는 방법이 많이 이용되고 있다. 그러나 카메라가 랜드마크로부터 멀리 떨어져 있는 경우나 화소의 해상도에 따라 추정 정밀도가 떨어지며 아주 어둡거나 밝은 환경하에서는 사용하기에 부적합하다. 등대 기법은 광학파나 음파를 발생할 수 있는 장치 (레이저빔, 초음파 센서) 와 그파를 반사시키는 물체 (corner cube, 등대) 그리고 반사파를 감지하는 장치(photo detector, 초음파 수신기)로 이루어져 있다. 초음파를 이용하는 방법중에서 인위적으로 설치된 등대를 사용하지 않고 미리 알려진 주위환경에 대한 데이터로부터 모델을 작성한 후 매칭기법을 이용하는 방법이 제시되고 있다 [4-5]. 그러나 이 방법들은 환경이 수시로 변하는 경우와 환경이 매우 복잡하여 모델을 만들기 힘든 경우 부적합하다.

본 연구에서는 하나의 회전 가능한 초음파 센서와 두개의 실린더형 등대를 이용하여 이동로봇의 위치와 방향을 추정하는 방법을 제시한다. 이방법은 저렴한 가격으로 실용화 할 수 있으며 추정 정밀도도 비교적 높다. 이 방법에서는 절대 좌표계에 대하여 두개의 원통형 등대의 위치와 등대의 반경이 주어진 경우, 이동로봇의 위치와 방향을 구하기 위하여 초음파 센서로부터 얻어진 sonar scan 데이터로부터 등대와 관련된 정보를 이끌어내는 것이다. 이를 위하여 본 연구에서는 일련의 데이터 처리 알고리즘이 제시되었으며 그 알고리즘의 성능은 실험을 통하여 입증되었다.

2. 시스템 구성

제시된 위치 추정 방법은 그림 1에서 보여진 이동로봇, LCAR에 적용되어 그의 성능이 평가되었다. 본 연구실에서 개발된 이동 로봇은 두개의 구동바퀴와 두개의 캐스터로 이루어져 있다. 이동 로봇은 구동바퀴의 속도차에 의하여 직진과 선회를 자유롭게 할 수 있다. 카메라와 회전 가능한 초음파 센서를 장착한 팬틸트장치는 이동 로봇 위에 장착되어 있으며 두개의 DC 서보 모터에 의하여 구동된다. 회전 가능한 초음파 센서는 이동 로봇에 고정된 좌표계(R)에 대하여 이동 로봇 주위에 놓여 있는 물체의 위치정보를 제공한다. 초음파 센서는 음파의 이동시간을 측정함으로써 반사파를 일으키는 물체까지의 거리 δ 를 구할 수 있다 [6].

$$\delta = \frac{v_s t_0}{2} \quad (1)$$

만약 환경이 walls, edges, corners, 실린더형 물체들로 이루어져 있다고 가정해 보자. 이러한 요소들은 이동로봇의 위치를 추정하는데 등대로써 사용될 수 있다. 그러나 이러한 요소들이 등대로서 사용될 수 있기 위해서는 몇가지 조건들을 만족하여야 한다. 그들은 초음파를 발사하는 위치에 관계없이 항상 강한 반사파를 되돌려 보낼 수 있어야 하며 그 요소들의 위치를 쉽게 알아낼 수 있는 특징점을 지녀야 한다. 본 연구에서는 이동로봇의 위치와 방향을 결정하기 위하여 등대로서 그림 2와 같이 2개의 원통형 등대를 사용한다. 실린더형 물체는 측정 위치에 따라 특징점의 위치가 변하지 않는다. 그리하여 한 지점으로 부터 얻은 물체의 거리 정보 데이터로부터 이동 로봇의 절대위치와 방향을 쉽게 구할 수 있다.

3. 이동 로봇의 위치 방향 결정

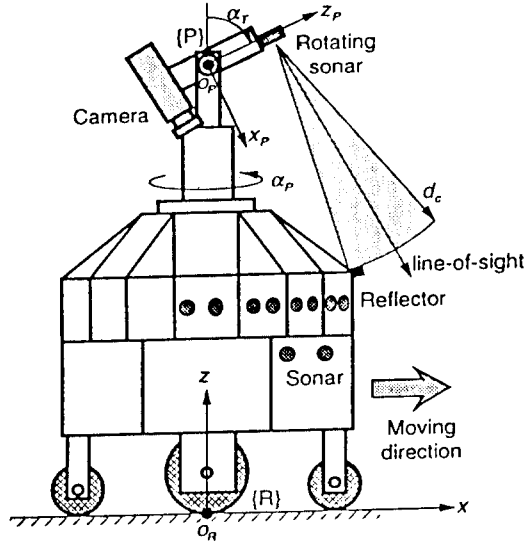


Fig. 1. Mobile robot, LCAR and sensors.

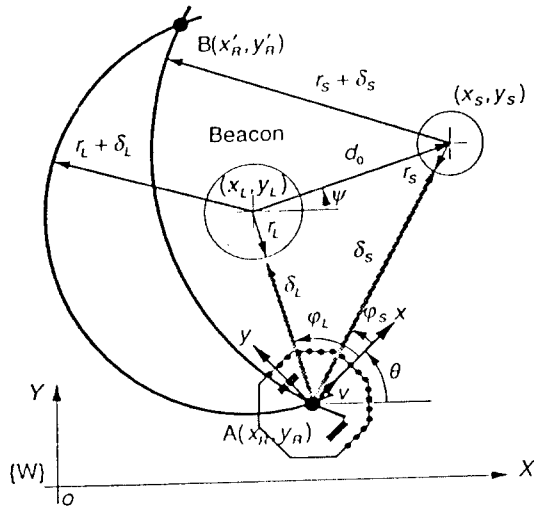


Fig. 2. Analytic geometry solution.

그림 2에서 보여준 바와 같이 이동 로봇이 o 점에 고정된 좌표계 $\{W\}$ 에 대하여 미지의 좌표점 (x_R, y_R) 에 놓여 있고 두 실린더의 위치와 반경들은 이미 주어졌다고 하자. 또한 거리값 δ_L 와 δ_S , 등대가 놓인 방향 φ_L 와 φ_S 는 초음파 센서에 의해 구할 수 있으므로 이동 로봇의 위치와 방향은 결정될 수 있다. 즉, 이동 로봇의 위치는 작은 등대의 중심점을 중심으로 하는 반경 $\delta_L + r_s$ 을 갖는 원과 큰 등대의 중심점을 중심으로 하는 반경 $\delta_S + r_L$ 을 갖는 두 원의 교점이 된다. 두 원의 방정식은 다음과 같다.

$$d_L^2 = (x_L - x_R)^2 + (y_L - y_R)^2 \quad (2)$$

$$d_S^2 = (x_S - x_R)^2 + (y_S - y_R)^2 \quad (3)$$

여기서 $d_L = \delta_L + r_L$ 이며 $d_S = \delta_S + r_S$ 이다. 만약 $x_L \neq x_S$ 이면 두 원의 교점은 다음과 같이 계산된다.

$$y_R = \frac{-(x_L \tan \psi - L \tan \psi - y_L) \pm \sqrt{DE}}{1 + \tan^2 \psi} \quad (4)$$

$$x_R = y_R \tan \psi + L \quad (5)$$

$$DE = (x_L \tan \psi - L \tan \psi - y_L)^2 - (\tan^2 \psi + 1)((x_L - L)^2 + y_L^2 - d_L^2) \quad (6)$$

여기서

$$\tan \psi = \frac{y_L - y_S}{x_L - x_S}, \quad L = \frac{(d_S^2 - d_L^2 + x_L^2 - x_S^2 + y_L^2 - y_S^2)}{2(x_L - x_S)}$$

이다. 만약 $x_L = x_S$ 이면 두 원의 교점은 다음과 같이 계산된다.

$$y_R = \frac{(d_L^2 - d_S^2 - y_L^2 + y_S^2)}{2(y_L - y_S)} \quad (7)$$

$$x_R = x_S \pm \sqrt{d_S^2 - (y_S - y_R)^2} \quad (8)$$

윗식에서 알 수 있듯이 만약 $DE < 0$ 이면 두 개의 허근이 존재하여 이동 로봇의 위치를 결정할 수 없으며 이는 센서의 부정확성 때문에 일어날 수 있다. 두 개의 가능한 이동 로봇의 위치 (x_R, y_R) 와 (x'_R, y'_R) 을 이용하여 두 등대 사이의 각 $\Delta \varphi = \varphi_S - \varphi_L$ 와 $\Delta \phi = \phi_S - \phi_L$ 은 각각 다음과 같이 계산된다.

$$\Delta \varphi = \varphi_S - \varphi_L = \tan^{-1} \left(\frac{y_S - y_R}{x_S - x_R} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{y_L - y_R}{x_L - x_R} \right) \quad (9)$$

$$\Delta \phi = \phi_S - \phi_L = \tan^{-1} \left(\frac{y_S - y'_R}{x_S - x'_R} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{y_L - y'_R}{x_L - x'_R} \right) \quad (10)$$

또한 두 등대 사이의 각은 센서에 의하여 측정된 등대의 방향각들을 이용하여 구할 수 있다. 그리하여 계산한 방향각 차이와 측정된 방향각 차이값을 서로 비교하여 그 부호가 서로 같은 방향각 차이값을 갖는 좌표점이 이동 로봇의 실제 위치가 된다. 따라서 이동 로봇의 방향각은 다음과 같이 구해진다.

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{y_L - y_R}{x_L - x_R} \right) - \varphi_L \quad (11)$$

여기서 φ_L 는 큰 등대가 놓인 방향을 나타낸다. 본 연구에서 위치 오차 E_y 와 방향 오차 E_θ 는 다음과 같이 정의된다.

$$E_y = \sqrt{(x_R - x_T)^2 + (y_R - y_T)^2} \\ E_\theta = |\theta - \theta_T| \quad (12)$$

여기서 (x_R, y_R) 와 θ 는 본 연구에서 제안한 방법을 이용하여 얻은 이동 로봇의 위치와 방향이며, (x_T, y_T) 와 θ_T 는 이동 로봇의 실제 위치와 방향이다.

4. 등대의 중심점 결정

이동 로봇의 위치와 방향을 결정하기 위하여 d_L , d_S , ϑ_L 그리고 ϑ_S 를 sonar scan 데이터로부터 추출해야 하며 그 과정은 다음과 같다.

A. sonar scan 데이터로부터 RCD 추출

그림 3에서 초음파 센서가 좌표계 {R}에 대하여 각 β_j 를 지향하고 있을 때 threshold값보다 큰 반사파들이 감지되기 시작하며 초음파 센서가 회전함에 따라 계속 반사파들이 감지되어 그림과 같이 거리값들은 원호를 형성한다. 그림에서 알 수 있듯이 각범위 $\eta = |\beta - \beta|$ 이 내에서는 거리값들은 거의 일정함을 알 수 있으며 이 원호는 동일한 물체에 의하여 생성되었음을 쉽게 알 수 있다. 그리하여 그 원호를 일정거리 영역 (RCD: Region of Constant Distance)으로 정의한다. 또한 η 를 RCD의 각범위 (angular extent)로 부르며 RCD의 기하학적 상수들의 집합을 $\chi = \{\delta, \beta, \eta\}$ 으로 정의한다. 여기서 δ 는 β 방향으로의 물체까지의 거리를 나타낸다. 이러한 기하학적 상수들은 등대의 위치를 결정하는데 직접 사용된다. 먼저 sonar scan 데이터는 팬-틸트 장치의 scanning에 의하여 구해지며 그들은 $\delta(k\Delta\phi)$, $k=1, 2, \dots, 360/\Delta\phi$ 으로 이루어져 있다. 여기서 $\delta(k\Delta\phi)$ 는 각 $k\Delta\phi$ 방향으로의 물체까지의 거리이며 $\Delta\phi$ 는 팬-틸트 장치의 각도 증분량이다. 각도 $(k-1)\Delta\phi$, $k\Delta\phi$ 그리고 $(k+1)\Delta\phi$ 방향으로의 거리값들을 각각 $\delta(k\Delta\phi)$, $\delta(k\Delta\phi)$ 그리고 $\delta(k+1)\Delta\phi$ 이라 하면 그림 3에 나타난 RCD의 양끝단에서의 각들은 smoothness 조건에 의하여 구할 수 있으며 sonar scan 데이터에 존재하는 모든 RCD를 구할 수 있다.

B. RCD의 각범위를 이용한 데이터 처리

위에서 모든 RCD들이 구해졌으므로 오직 등대와 관련된 RCD만을 찾아 내야 한다. 이를 위하여 RCD의 각범위 조건을 사용한다. 등대의 직경이 12.0cm보다 큰 경우 등대의 위치의 변화에 대하여 각범위는 24.0°로부터 25.5°까지 미소 변화하며 등대의 직경이 12.0cm보다 작은 경우 등대의 위치의 변화에 대하여 각범위는 20.0°로부터 24.0°까지 변화를 실험을 통하여 확인하였다[7-8]. 따라서 각범위가 $18.0 \leq \eta \leq 26.0$ 인 RCD만이 다음의 데이터 처리 단계에 사용될 것이다.

C. 대칭성을 이용한 데이터 처리

위의 조건을 만족하는 RCD일지라도 그들은 등대에 의하여 생성되지 않은 RCD일 수 있다. 그리하여 원뿔형 등대의 대칭성을 데이터 처리에 이용한다. 만약 등대에 의하여 형성된 RCD라면 RCD를 이루고 있는 거리값들은 등대의 중심과 이동 로봇의 중심을 연결한 선을 중심으로 거의 대칭을 이룰 것이다. 따라서 대칭성을 나타내는 척도 γ 를 다음과 같이 정의한다[7-8].

$$\gamma = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \left| \delta\left(\beta - \frac{i \cdot \eta}{2M}\right) - \delta\left(\beta + \frac{i \cdot \eta}{2M}\right) \right| \quad (16)$$

여기서 M 은 $\text{INT}(N/2)$ 이며 N 은 RCD를 이루고 있는 데이터의 수를 나타낸다. 또한 INT 는 정수화 오퍼레이터이다. 그리하여 threshold 값 γ 보다 작은 값을 가지는 RCD만이 다음의 데이터 처리과정에서 사용될 것이며 threshold값은 실험적으로 결정된다.

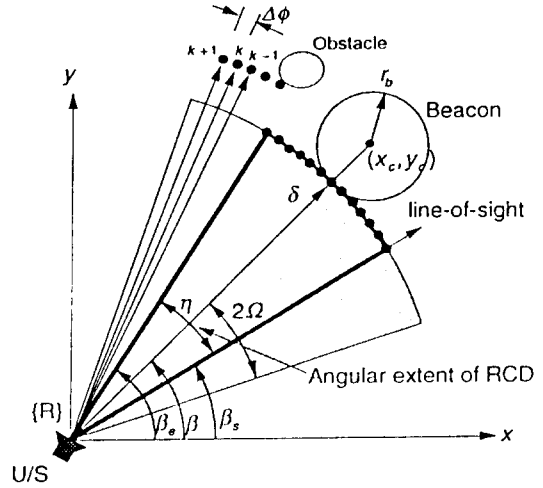


Fig. 3. The process of formation of a RCD by beacon.

D. 기지의 정보를 이용한 데이터 처리

RCD의 기하학적 상수들이 $\chi_n = \{\delta_n, \beta_n, \eta_n\}$, ($n=1, 2, \dots, m-1, m, \dots, P$)로 주어져 있다고 하자. 여기서 아래첨자 n 은 P 개의 RCD 중에서 n 번째의 RCD를 나타낸다. 두 등대의 위치 (x_L, y_L) 와 (x_S, y_S) 는 주어지기 때문에 두 등대 사이의 거리 d_0 는 계산될 수 있다. 즉 ($m-1$)번째와 m 번째 RCD는 각각 작은 등대와 큰 등대에 의하여 생성된 것이라고 하면 기하학적 상수들에 의하여 계산된 두 등대 사이의 거리 \hat{d}_0 와 실제로 주어진 등대사이의 거리 d_0 의 오차는 다음과 같이 계산된다.

$$\Delta d_0 = |d_0 - \hat{d}_0| = \left| d_0 - \sqrt{d_S^2 + d_L^2 - 2d_L d_S \cos(\vartheta_S - \vartheta_L)} \right| \quad (17)$$

여기서, 만약 $\eta_m > \eta_{m-1}$ 이면 $d_L = \delta_m + r_L$, $d_S = \delta_{m-1} + r_S$, $\vartheta_L = \vartheta_m$ 그리고 $\vartheta_S = \vartheta_{m-1}$ 으로 되며, 만약 $\eta_m < \eta_{m-1}$ 이면 $d_L = \delta_{m-1} + r_L$, $d_S = \delta_m + r_S$, $\vartheta_L = \vartheta_{m-1}$ 그리고 $\vartheta_S = \vartheta_m$ 으로 된다. 또한 $\eta_m = \eta_{m-1}$ 인 경우 큰 거리값을 가지는 RCD는 큰 등대에 의하여 형성된 것으로 생각할 수 있다. 거리 오차 Δd_0 는 남아 있는 모든 RCD의 조합에 대하여 계산한 후 허용 범위 오차내에서 가장 작은 오차를 가지는 RCD의 한쌍만을 이용하여 이동 로봇의 위치와 방향을 구한다.

5. 위치 추정 실험

A. 실험 조건

제안된 방법의 성능을 시험하기 위하여 일련의 실험을 수행하였다. 이동 로봇이 놓여 있는 주위 환경은 그림 4와 같고 그 크기는 6.2m x 5.0m이며 그림속의 격자 크기는 0.5m x 0.5m이다. 그림의 검은 점은 좌표점 (2.85m, -0.6m)와 (0.3m, -1.5m)에 놓여 있는 작은 등대와 큰 등대의 위치를 나타낸다. 또한 실험에 사용된 모든 상수 및 물리량들이 표 1에 주어져 있다.

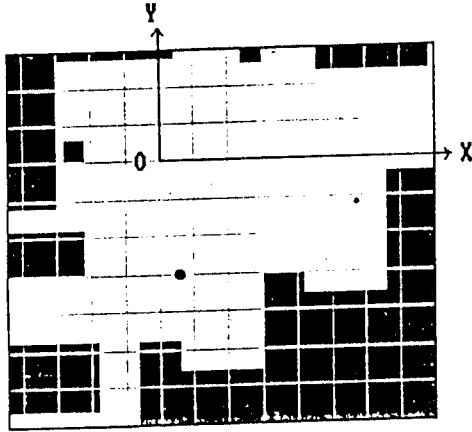


Fig. 4. The indoor environment for experiment of localization.

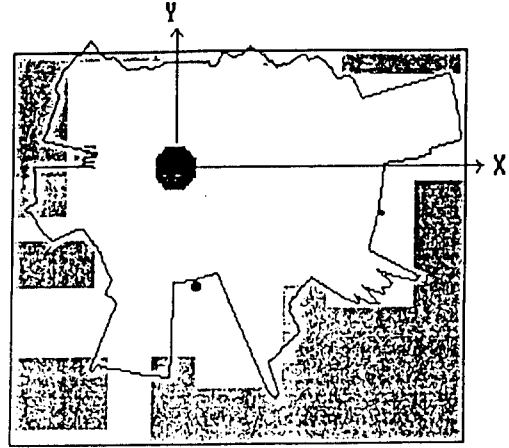


Fig. 5. Sonar scan data obtained at origin of world coordinate frame.

Table I. Physical dimensions and Parameters.

Parameters & dimensions	Values
Angle between adjacent sensors, $\bar{\varphi}$	11.25°
Radius of mobile robot, R	0.3m
Radius of small beacon, r_s	0.038/2m
Radius of large beacon, r_l	0.14/2m
Minimum sensing range of sensor, R_{min}	0.45m
Maximum sensing range of sensor, R_{max}	4.0m
Threshold value of symmetry measure, γ_T	0.005m
Measure determining RCD, ϵ	0.02m
Incremental rotation angle, $\Delta\phi$	1.0°

Table II. The geometric parameter set and symmetry measure.

RCD No.	δ [m]	β [degree]	η [degree]	γ [m]
1	2.8542	-10.3	22.0	0.0027
2	1.4401	-78.3	24.0	0.0012
3	1.4612	-140.3	18.0	0.0074
4	1.8311	158.7	18.0	0.0021

B. 실험 절차

그림 5에서 8각형으로 그려진 것은 이동 로봇이 이 지점에서 sonar scan 데이터는 초음파 센서에 의하여 얻어진다. 초음파 센서에 의해 얻어진 sonar scan 데이터에 smoothness 조건을 적용하면 모든 RCD들이 구해지며 그 RCD에 각 범위 조건 $18.0 \leq \eta \leq 26.0$ 을 적용하면 그림 6처럼 4개의 RCD만이 남게 된다. 그들에 대한 기하학적 상수들이 표 2에 주어져 있다. 4개의 RCD에 대칭성 조건을 적용하면 3번째 RCD만이 사라진다. 이것은 표 2에 주어진 대칭성 척도 γ 의 값을 관찰함으로써 알 수 있다. 따라서 3개의 RCD에 각각 이미 주어진 등대사이의 거리와 실제로 기하학적 상수들을 이용하여 계산한 값과의 차이를 계산함에 의해 이동 로봇의 위치 추정에 사용될 한쌍의 RCD들이 구해진다. 첫번째와 두번째, 첫번째와 세번째 그리고 두번째와 세번째 RCD들에 의해 계산된 등대사이의 거리와 이미 주어진 등대사이의 거리사이의 오차는 각각 0.031m, 2.049m 그리고 0.257m이었다. 또한 거리 오차의 허용한계는 0.04m로 설정하였으므로 첫번째와 두번째 RCD들에 의하여 이동 로봇의 위치와 방향이 계산된다.

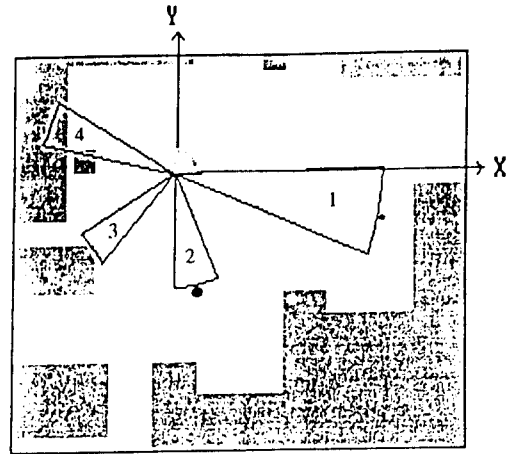


Fig. 6. The RCD's satisfying the angular extent condition.

C. 이동 로봇의 위치와 방향 추정을 위한 실험

실험을 위하여 그림 7에 보여진 3개의 직선 경로들이 사용되었다. 경로상의 점은 사각형으로 표시된 지점에서 위치와 방향을 추정한다. 그림 8은 경로 P1상의 좌표점 (1.2m, 0.0m) 근방에서 바퀴와 바닥면 사이에 미끄

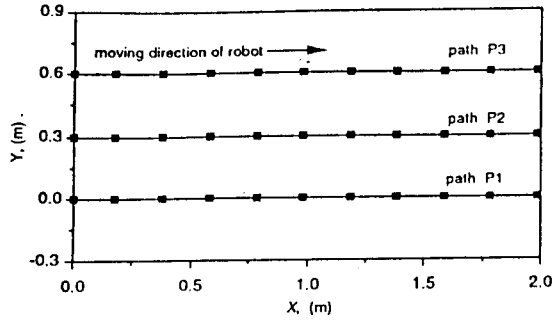


Fig. 7. Three straight line paths and mobile robot positions where the estimation is performed.

럼이 발생하는 경우의 실험 결과를 보여주고 있다. 그림의 위, 아래그림들은 각각 위치 오차와 방향각 오차를 보여 주고 있다. 이러한 오차들은 실제값들과 추정된 값들 사이의 차를 나타낸다. 이동 로봇의 실제 위치는 바닥에 깔려 있는 30cmx30cm 크기의 타일을 이용하여 두바퀴의 중심을 측정함으로써 계산되었다. 제안된 방법과 사산법에 의하여 얻은 실험결과들이 그림 8에 비교되었다. 그림에서 알 수 있듯이 사산법은 미끄럼이 없거나 짧은 거리를 수행하는 경우에 적합한 방법임을 알 수 있다. 사산법의 오차는 바닥의 불균일성에 의하여 생긴 것으로 추측된다. 반면에 제안된 방법의 오차는 센서에 의하여 구한 거리값 δ 와 방향각 β 의 오차에 의하여 발생한 것으로 추측된다. 펜, 틸트 장치의 증분각이 작으면 작을수록 추정 오차는 줄일 수 있으나 sonar scan 데이터를 얻는 데에 많은 시간이 소요된다. 그림에서 볼 수 있듯이 사산법은 커다란 오차를 유발하는 반면에 제안된 방법은 비교적 정밀한 위치 추정 능력을 보여 준다.

6. 결론

본 연구에서는 두개의 원통형 등대와 회전 가능한 하나의 초음파 센서를 이용하여 이동 로봇의 위치와 방향을 추정하는 방법을 제안하였다. 제안된 방법은 한지점에서 얻은 이동 로봇 주위의 거리 정보로부터 이동 로봇의 위치와 방향을 추정할 수 있으며 실제로 이동 로봇 I.CAR을 이용하여 실험하였다. 이를 실현하기 위하여 sonar scan 데이터로부터 등대의 위치를 알아내기 위한 일련의 데이터 처리 기법들이 제안되었다. 실험은 실내 환경내에서 이루어졌으며 실험 결과 제안된 방법은 비교적 정확한 위치와 방향을 추정할 수 있었다. 제안된 방법은 특히 미끄럼이 발생하는 경우에 유용하게 쓰일 수 있으며 환경의 특수성으로 인하여 다른 기법들이 사용될 수 없는 경우에 하나의 대안으로 쓰일 수 있을 것이다.

참고 문헌

- [1] S. Yuta, Y. Kanayama, T. Yajima and S. Shimamura, "An implementation of MICH-A locomotion command system for intelligent mobile robot" *Proc. Int. Conf. Advanced Robotics* (1985) pp.127-134.
- [2] J.H. Kim and H.S.Cho, "Real-time determination of a mobile robot's position by linear scanning of a landmark" *Robotica* 10, 309-319 (1992).

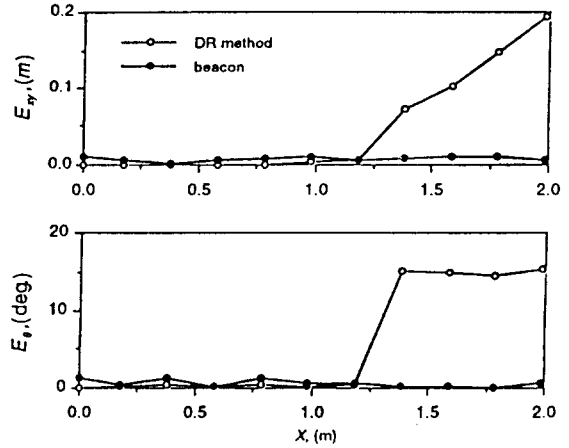


Fig.8. The experimental results of the estimation of robot position and heading angle when slippage occurs.

- [3] K. Nishide, M. Hanawa and T. Kondo, "Automatic position findings of vehicle by means of Laser" *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation* (1986) pp.1343-1348.
- [4] M. Drumheller, "Mobile robot localization using sonar" *IEEE Trans. Patt. Anal. and Machine Intell.* 9, No.2, 325-332 (1987).
- [5] J. J. Leonard and H. F. Durrant-Whyte, "Mobile robot localization by tracking geometric beacons" *IEEE Trans. Robotics and Automation* 7, No.3, 376-382 (1991).
- [6] O. Bozma and R. Kuc, "Building a sonar map in a specular environment using a single mobile sensor" *IEEE Trans. Patt. Anal. and Machine Intell.* 13, No.12, 1260-1269 (1991).
- [7] H.R. Beom and H.S. Cho, "Mobile robot localization using a single rotating sonar and two cylindrical beacon" *Robotica* (to appear)
- [8] H.R. Beom, "A study on the AI-based navigation and obstacle detection for mobile robots", *Ph.D. Dissertation*, KAIST 1994.