

◆특집◆ 가공과 진동

장애물 위치 정보를 이용한 모바일 로봇의 2차원 지도 작성에 관한 연구

이준호[#], 홍현주^{*}, 강석주^{**}

(한국폴리텍1대학서울정수캠퍼스[#], LG 화학^{*}, 한국산업인력공단^{**})

Using the obstacle position information of the mobile robot in the two-dimensional cartography Study

Jun-Ho Lee[#], Hyun-Ju Hong^{*}, Seog-Joo Kang^{**}

(Received 5 February 2014; received in revised form 17 February 2014; accepted 26 February 2014)

ABSTRACT

The purpose of this study is to build and manage environment models with line segments from sonar range data on obstacles in unknown and varied environments. The proposed method therefore employs a two-stage data-transform process in order to extract environmental line segments from range data on obstacles. In the first stage, the occupancy grid extracted from the range data is accumulated to form a two-dimensional local histogram grid. In the second stage, a line histogram extracted from a local histogram grid is based on a Hough transform, and matching serves as a means of comparing each of the segments on a global line segments map against the line segments to detect the degree of similarity in the overlap, orientation, and arrangement. Each of these tests is formulated by comparing one of the parameters in the segment representation. After the tests, new line segments can be found at maximum-density cells in the line histogram, and they are composed onto the global line segment map. The proposed technique is demonstrated in experiments in an indoor environment.

Key Words : Mobile Robot(모바일로봇), Map Building(지도작성), Line Segments(라인 세그먼트), Histogram Grid(히스토그램격자), Hough Transform(허프변환)

1. 서 론

이동로봇에서 초음파 센서는 전방에 있는 물체에 대한 거리정보를 손쉽게 값싸게 제공해 주므로 이동로봇의 장애물 회피를 위하여 가장 널리 사용되고 있다. 비록 장애물에 대한 정보가 부정확하고, 거울현상으로 자주 잘못된 정보를 제공하는 단점이 있으나 초음파 센서는 이동로봇이 실시간으로 장애물과의 충돌을 회피하면서 목표점까지 주

Corresponding Author :

Department of Mechatronics Engineering, Korea
Polytechnic I. Jungsu Campus

E-mail : leeyj@kopo.ac.kr

* LG Chemical Co. Ltd.

** H.R.D Korea

행하는 데 필요한 충분한 정보를 제공해 준다. 또한 이동로봇 주행중에 얻은 장애물 위치정보를 누적하면 장애물 형상에 대한 정보를 제공해 줄 수 있으므로 이를 2차원 지도작성에 이용할 수 있다.

초음파 센서에 의한 지도작성 방법으로는 격자 지도방법과 모델 기반 지도 방법으로 분류할 수 있다[1]. 격자지도 방법은 작업공간을 일정한 크기의 격자로 나누고 각 격자에 장애물이 점령하고 있는지에 대한 확률적 값을 부여하는 방법이다 [2][3]. 이 방법은 실시간으로 얻은 장애물 정보를 쉽게 누적시킬 수 있고, 정확도가 떨어지는 초음파 센서나 적외선 센서 같은 근접센서들을 이용하여도 장애물 회피나 지도작성에 필요한 장애물 정보를 안정적으로 제공해 주는 장점이 있다. 반면 주변 환경의 조건-장애물의 유무나 크기 등-에 상관없이 전체 작업공간에 대한 정보를 저장해야 하므로 효율적이지 못하다. 특히 이동로봇의 위치오차 혹은 작업환경의 변화 등에 의해 실존하지 않는 지도상의 장애물 정보를 제거할 수 있는 적절한 방법이 없어 진행이 될수록 지도의 정확성이 떨어지는 단점이 있다. 반면 모델 기반 지도는 공간을 평면, 모서리, 구석 등의 모델로 표현한 지도이다 [4,5]. 이러한 지도는 이동로봇 주위환경에 대한 센서정보를 이용하여 기존의 정보를 수정하기 용이하며 작업공간 내의 장애물 정보를 효율적으로 표현할 수 있다. 따라서 지도를 이동로봇의 위치보정, 전역 경로계획 등에 효과적으로 활용할 수 있다. 그러나 모델기반 지도 방법은 센서의 정도에 민감하여 초음파 센서와 같이 부정확하고 자주 오류 정보를 제공하는 센서를 이용하여 지도를 생성하는 경우 장애물에 대한 기하학적 형상을 제대로 인식하지 못하여 모델 정보를 생성하지 못하거나 잘못된 모델을 다량 생성하는 문제가 있다.

본 논문에서는 상기 두 지도작성 방법을 혼합한 직선 선분 지도 생성 방법을 제안하였다. 먼저 초음파 센서 정보를 이동로봇의 주변 일정영역에 설정된 지역 히스토그램 격자에 누적시켜 장애물의 기하학적 형태가 격자지도에 형성되도록 하였다. 다음으로 지역 히스토그램 격자지도로부터 직선 선분을 추출하여 직선 선분들로 구성된 모델 기반 지도를 생성하였다. 즉 장애물에 대한 기하학적 정

보를 얻기 위해 이동로봇 이동 중에 초음파 센서로부터 얻어진 장애물 위치에 대한 정보를 그대로 이용하지 않고 격자지도에 누적된 정보를 이용함으로써 센서 정도에 둔감하고 안정된 모델 정보를 얻을 수 있고, 동적이고 제한된 크기의 격자지도를 사용함으로써 정보량을 줄이고 변화하는 환경에도 적용 가능하도록 하였다. 특히 지역 히스토그램 격자지도는 VFH(vector field histogram)에 의한 장애물 회피[6]에도 그대로 사용할 수 있으므로 지도작성 문제와 장애물 회피 문제를 동시에 다룰 수 있는 장점이 있다.

2. 지역 히스토그램 격자지도 생성

전역 히스토그램 격자지도는 이동로봇의 이동 중에 검출된 장애물 정보를 기록하고 이를 실시간 장애물회피에 이용하기 위하여 개발된 방법이다[7]. 각 격자에는 Fig 1에서 보는 바와 같이 장애물에 의한 점령 가능성을 보여주는 확실성 값이 부여되어 있다. 이동로봇이 이동 중에 실시간으로 확실성 값을 부여하기 위하여 Fig 2와 같은 간략화된 방법을 사용하였다. 즉 장애물이 검출된 경우 초음파 센서 중심 축 상에 있는 하나의 격자만 확실성값을 3 증가(최대값은 15)시키고 그 격자에 이르는

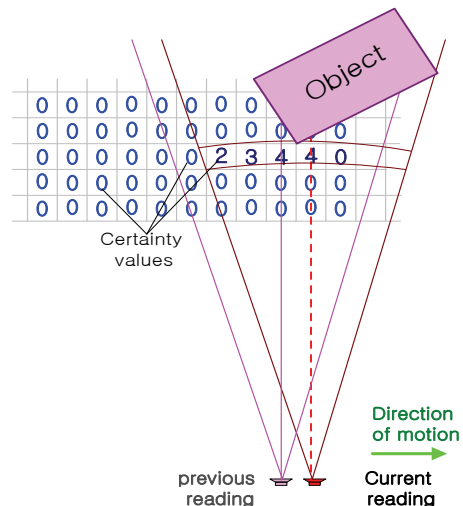


Fig. 1 Generation of the histogram grid

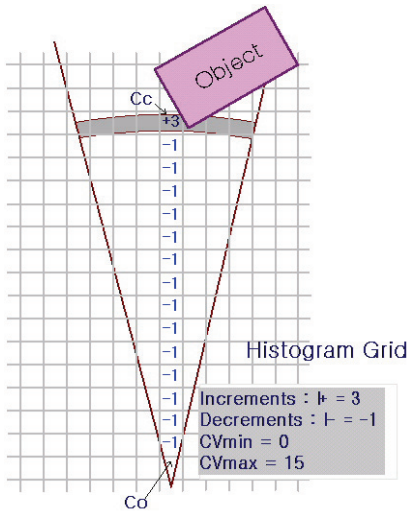


Fig. 2 Updating certainty value of grid

선상에 있는 격자들의 확실성값은 1 감소(최소값은 0)시킨다. 이는 오류 검출로 인한 잘못된 확실성값을 보정하고 각 격자에 장애물의 존재 유무에 대한 확률적 해석이 가능하게 하기 위한 방법이다. 상기 방법을 실제 적용시 초음파 센서의 부정확성에 의한 영향으로 장애물 표면에 해당하는 격자의 확실성값이 고르지 않고 산만해지는 경우가 자주 발생하게 되는데 이를 보정하기 위하여 GRO(growth rate operator)를 도입하였다. GRO는 장애물이 검출된 주변 격자의 확실성값에 따라 검출된 격자의 확실성값을 증가시켜 주어 인접한 격자들의 확실성값을 고르게 해주는 지역 필터와 유사한 역할을 수행한다. 이상의 고려에 의해 장애물이 감지된 격자의 확실성값은 다음 식(1)에 의해 결정된다.

$$CV'_{i,j} = CV_{i,j} + I^+ + \sum_{p,q=-1}^{p,q=1} (w \cdot CV_{i+p,j+q}) \quad (1)$$

(i, j) : 장애물이 감지된 격자의 인덱스

$CV'_{i,j}$: 장애물 감지 후 확실성값

$CV_{i,j}$: 장애물 감지 전 확실성값

I^+ : 확실성값 증분(= 3)

w : GRO 하중인자(= 0.5)

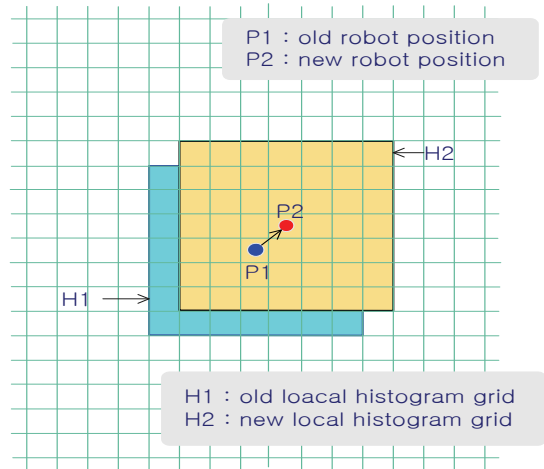


Fig. 3 Cartesian space of local histogram grid

본 연구에서 작업공간내 직선선분 추출을 위해 사용하는 지역 히스토그램 격자지도는 로봇 주위의 제한된 공간내에 있는 격자들로 구성되며 이는 전역 히스토그램 격자지도의 일부가 아닌 독립적인 동적 격자지도이다. Fig 3에서와 같이 이동로봇이 격자사이를 이동하면 새로운 격자지도영역이 형성되고 이에 포함되지 않는 과거의 격자 정보는 제거된다. 따라서 정보량은 항상 일정하며 과거 장애물 정보가 제거되므로 변화하는 환경에 대응할 수 있다. 본 연구에서는 이동로봇의 크기(80(cm) x 80(cm))를 고려하여 격자 크기를 10(cm) x 10(cm)로 하였고, 지역 히스토그램 격자지도의 크기는 초음파 센서의 유효측정 거리(2m)를 고려하여 310(cm) x 310(cm)로 하였다.

3. 격자지도로부터 직선선분 추출

3.1 직선선분의 정의

지도상의 각 직선선분은 Fig 4에서와 같이 기준 좌표계에 대하여 정의되며, 위치정보를 표시하는 4개의 매개변수, 위치 오차범위를 표시하는 2개의 매개변수, 존재여부의 확실성을 표시하는 1개의 매개변수 등 총 6개의 매개변수로 표시한다.

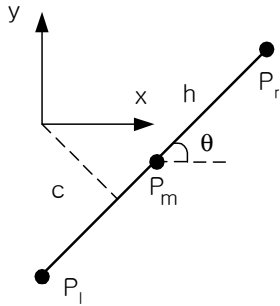


Fig. 4 Parametric representation for line segment

- P_m : 직선선분의 중점 (x_m, y_m)
- θ : 직선선분의 방향
- h : 직선선분의 반 길이
- σ_θ : 방향오차의 표준편차
- σ_c : 거리오차의 표준편차
- CF : 확실성 인자(confidence factor)

직선선분에 대한 여분의 매개변수는 다음과 같다.

- c : 수직 거리(= -sin(θ)x + cos(θ)y)
- P_r : 직선선분의 오른쪽 끝점
- P_l : 직선선분의 왼쪽 끝점

3.2 직선선분의 추출

지역 히스토그램 격자지도에 형성된 장애물 형상에 대한 정보로부터 직선선분을 추출하기 위해, 이미지 정보로부터 기하학적 형상을 추출하는 수단으로 많이 이용되고 있는 허프변환(Hough transform)을 사용한다[8]. 식 (2)의 직선 방정식을 이용하여 직각좌표계 공간의 점들을 허프 파라미터 공간으로 변환한다.

$$\rho = x \cos \theta + y \sin \theta \quad (2)$$

Fig 5는 식 (2)를 이용하여 허프변환한 결과를 보여주고 있다. 점 a, b, c는 (x, y)공간에서 직선상의 점들로 이를 허프변환하면 Fig 5와 같이 (ρ,

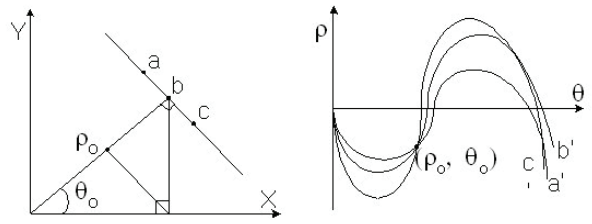


Fig. 5 The Hough transform

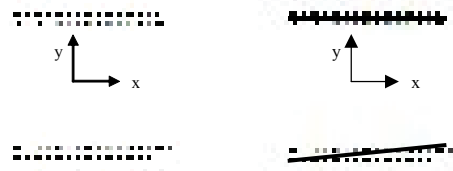


Fig 6. An example of local histogram grid and line segments extracted by Hough transform

θ)공간에서 각각 정현파 곡선으로 변환되며 하나의 점에서 교차하게 된다. 따라서 정현파가 많이 교차하는 교점의 위치를 찾아서 이를 (x, y)공간에 적용하면 직선선분을 추출할 수 있다.

실제 알고리즘을 구성할 때 교점의 위치를 찾기 위하여 (ρ, θ)공간을 일정한 크기로 분할하여 격자를 생성하고 정현파 곡선 상에 놓이는 격자의 값을 증가시키면 격자값은 정현파 곡선의 교차횟수를 표시하게 된다. 따라서 교점의 위치를 찾는 문제는 지역 최대 격자값을 갖는 격자를 찾는 문제가 된다.

Fig 6은 복도 주행 중 이동로봇이 생성한 지역 히스토그램 격자지도에서 Fig 7과 같이 허프변환 후 다시 역변환하여 직선 선분을 추출한 예를 보여준다.

허프변환을 이용하여 생성된 직선선분과 실제 장애물 표면과는 정확하게 일치하지 않으며 이러한 오차의 주요한 원인은 작업공간의 격자화에 따른 양자화 오차와 이동로봇 위치가 증가할수록 누적되는 Dead Reconning 오차 때문이다. 먼저 양자화 오차에 의한 위치오차 분산은 생성된 직선선분

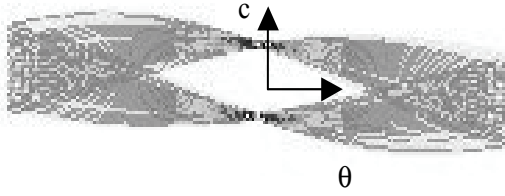


Fig. 7 Hough transform for a local histogram grid

의 시작점 및 끝점의 위치에 대한 불확실성 값을 동일하게 σ_w 라 놓으면 다음 식 (3)과 같이 구할 수 있다[9][10].

$$\begin{aligned}\sigma_{c_q}^2 &= \frac{\sigma_w^2}{2} \\ \sigma_{\theta_q}^2 &= \frac{\sigma_w^2}{2h^2}\end{aligned}\quad (3)$$

또한 Dead Reconing에 의한 이동로봇의 위치오차 분산을 C_{xy} 라 할 때 다음 식 (4)와 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}\sigma_{cr}^2 &= M^T C_{xy} M \\ &= [a \quad b] \begin{bmatrix} \sigma_x^2 & \sigma_{xy} \\ \sigma_{xy} & \sigma_y^2 \end{bmatrix} [a \quad b]^T \\ &= a^2 \sigma_x^2 + 2ab \sigma_{xy} + b^2 \sigma_y^2\end{aligned}\quad (4)$$

여기서 $a = -\sin(\theta)$, $b = \cos(\theta)$ 이다.

상기 두 가지의 직선선분의 위치오차 원인은 상호 독립적이므로 격자지도로부터 생성된 직선선분의 위치오차는 다음 식 (5)와 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}\sigma_c^2 &= \sigma_{c_q}^2 + \sigma_{cr}^2 \\ \sigma_\theta^2 &= \sigma_{\theta_q}^2 + \sigma_{\theta_r}^2\end{aligned}\quad (5)$$

여기서 $\sigma_{\theta_r}^2$ 는 Dead Reconing에 의한 이동로봇의 방향 오차분산 값으로 칼만 필터의 오차분산항에 의해 구해진다.

4. 직선선분의 융합

지역 히스토그램 격자지도에서 추출된 직선선분이 전역지도 상에 등록된 직선선분들과 융합되는지를 알기 위해 중복 검사, 방향 검사, 정렬 검사를 수행하고 결과에 따라 전역지도에 직선선분의 추가, 융합, 삭제 등의 작업을 수행하여 직선선분 지도를 작성한다[4].

4.1 중복 검사

중복 검사는 이동로봇 주위의 장애물 정보에 의하여 생성된 직선선분이 이전에 기록된 장애물에 대한 정보와 중복이 되는지를 검사한다. L_1 은 새로 생성된 직선선분으로 매개변수는 $(p_{l_1}, p_{r_1}, p_{m_1}, c_1, \theta_1, \sigma_{c_1}, \sigma_{\theta_1})$ 라 가정하고, L_2 는 전역지도상에 있는 기존의 직선선분으로 $(p_{l_2}, p_{r_2}, p_{m_2}, c_2, \theta_2, \sigma_{c_2}, \sigma_{\theta_2})$ 라 가정한다. Fig 8에서와 같이 두 직선이 겹쳐지는 부분의 오른쪽 끝점은 P_1 이고, 왼쪽 끝점은 P_2 이다. 양 끝점사이의 각을 2등분하는 직선을 긋고 이를 직선 L_3 라 한다. 직선선분 L_1 , L_2 와 직선 L_3 가 만나는 점을 $p_1(x_1, y_1)$, $p_2(x_2, y_2)$ 라 하면 식 (6)에 의해 두 직선선분의 거리를 평가하고 중복성 여부를 판단한다. 여기서 δ_d 는 거리 평가 상수이다.

$$\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} < \delta_d \quad (6)$$

만약 새로운 직선선분이 전역지도 상의 어떠한 직선선분과도 중복되지 않는다면 이는 지도상에 기록되지 않은 장애물 정보를 표현하고 있는 것으로 판단하여 이를 지도에 추가한다.

4.2 방향 검사

중복검사에서 새로운 직선선분과 중복되는 기존의 직선선분이 찾아지면 두 직선선분의 각도 차 융합하기에 적합한지를 식 (7)을 기준으로 평가한다. 여기서 δ_θ 는 방향오차 허용범위를 결정하는 상수이다.

$$(\theta_1 - \theta_2)^2 \leq \delta_\theta (\sigma_{\theta_1}^2 + \sigma_{\theta_2}^2) \quad (7)$$

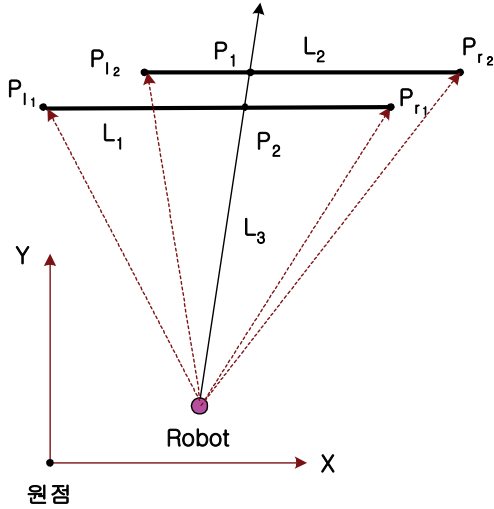


Fig. 8 The overlap test for lines

두 직선선분의 각도 차가 오차허용범위 보다 크다면 융합 불가능하고 기존의 직선선분은 오류정보일 가능성이 크다.

4.3 정렬 검사

방향 검사를 통과하면 일단 두 직선선분은 융합 가능하다고 가정하고 융합된 직선선분의 방향 θ 를 식 (8)과 같이 구한다.

$$k_{\theta} = \frac{\sigma_{\theta_1}^2}{(\sigma_{\theta_1}^2 + \sigma_{\theta_2}^2)} \quad (8)$$

$$\theta = \theta_1 - k_{\theta}(\theta_1 - \theta_2)$$

$$\sigma_{\theta}^2 = \sigma_{\theta_1}^2 - k_{\theta} \sigma_{\theta_1}^2$$

다음 두 직선선분에 융합 방향 θ 를 각각 적용하여 원점으로부터 수직거리 c_1 및 c_2 를 식 (9)와 같이 구한다.

$$c_1 = -\sin(\theta)x_{m_1} + \cos(\theta)y_{m_1}$$

$$c_2 = -\sin(\theta)x_{m_2} + \cos(\theta)y_{m_2} \quad (9)$$

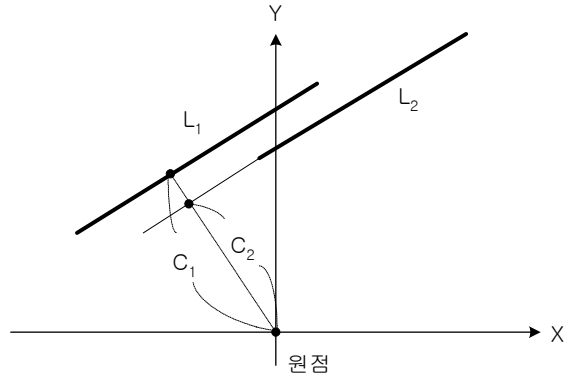


Fig 9. Line segment parameter for alignment test

정렬검사는 Fig 9과 같이 직선선분 L_1, L_2 간의 거리가 융합 가능한 범위에 있는가를 검사하는 것으로 식 (10)을 기준으로 판단한다. 여기서 δ_c 는 거리오차 허용범위를 결정하는 상수이다.

$$(c_1 - c_2)^2 \leq \delta_c (\sigma_{c_1}^2 + \sigma_{c_2}^2) \quad (10)$$

두 직선선분의 거리가 오차 허용범위보다 크다면 융합 불가능하고 기존의 직선선분은 오류정보일 가능성이 크다.

4.4 직선 선분 융합

두 직선선분이 3가지 검사를 모두 만족하면 하나의 직선선분으로 융합할 수 있다. 융합한 직선의 매개변수 c , 및 σ_c 는 식 (11)에 의해 구할 수 있다.

$$k_c = \frac{\sigma_{c_1}^2}{(\sigma_{c_1}^2 + \sigma_{c_2}^2)}$$

$$c = c_1 - k_c(c_1 - c_2) \quad (11)$$

$$\sigma_c^2 = \sigma_{c_1}^2 - k_c \sigma_{c_1}^2$$

Fig 10은 상기 과정을 거쳐 융합된 직선선분을 보여준다.

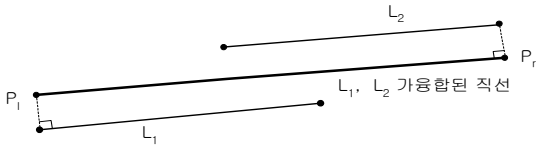


Fig. 10 Matched line segments after the alignment test

4.5 직선의 추가 및 삭제

새롭게 발견된 장애물에 대한 직선선분을 전역 지도에 추가하거나 전역지도 상에 있는 오류 선분을 삭제하는 것은 융합과정에 직선선분의 확실성 인자 CF값을 관리하므로써 이루어진다. Fig 11는 CF 값을 결정하는 방법을 설명하고 있다. 여기서 i 는 전역지도 상에 있는 직선선분을, k 는 새로 생성된 직선선분을 나타낸다. 새로운 직선선분이 생성되면 CF값은 3으로 초기화하고, 생성된 직선선분이 기존의 직선선분들과 중복되지 않거나 융합되지 않으면 전역지도에 생성된 직선선분을 추가한다. 만일 새로운 직선선분과 중복되는 기존 직선선분이 존재하나 융합되지 않으면 기존 직선선분의 CF값을 감소시키고, 융합되면 CF값을 증가시킨다. CF값이 0인 직선선분은 오류 선분으로 판단하여 전역지도에서 제거시킨다.

5. 실험 및 결과

실험에 사용된 초음파 센서는 Polaroid사 제품으로 중심으로부터 $\pm 15^\circ$ 범위에 있는 장애물을 10(m) 까지 측정할 수 있으나 장애물회피 혹은 지도작성을 위하여 감지거리를 2m 로 제한하여 사용하였다.

이동 중에 전방 및 측방에 있는 장애물에 대한 충분한 정보를 얻기 위하여 15개의 센서를 15° 간격으로 원형으로 배치하였고 한번에 한 개씩 동작하는 스캔 방식으로 동작하며 1회 스캔시간은 약 1(sec)이다. 이동로봇은 미국 TRC 사의 LABMATE를 이용하였다. 주행 중에 장애물에 의해 점령된 모든 격자를 감지할 수 있도록 주행속도를 10 (cm/s)로 제한하였다. 이동 로봇의 주행 속도와 초음파 센서의 1회 스캔 시간을 고려하여 격자크기는 10(cm)로 결정하였다.

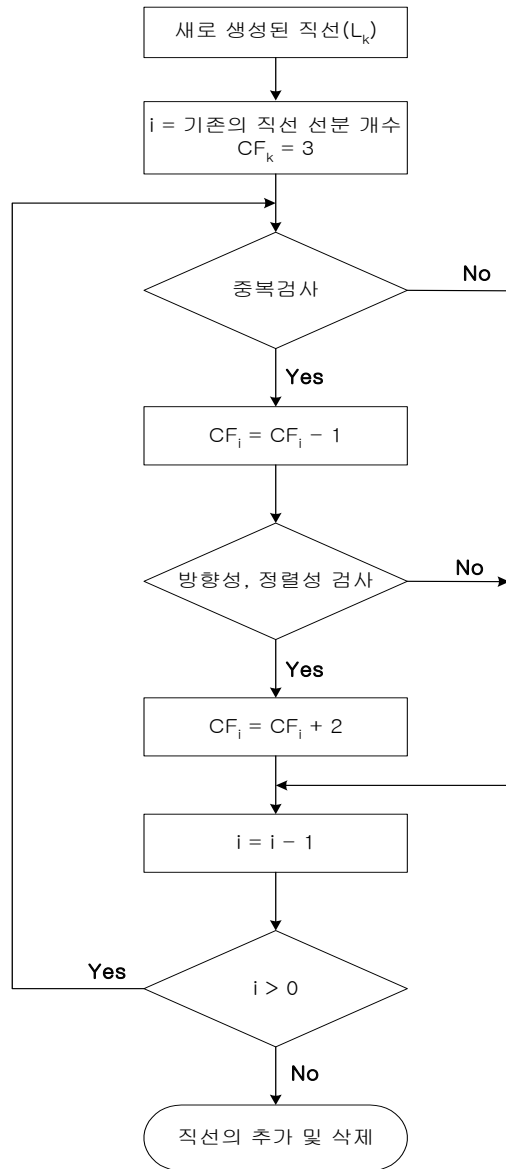


Fig 11. The flowchart for CF value decision

실험은 건물 내의 로비(16m x6m)에서 수행하였고 이동 로봇은 미리 정해진 경로를 따라 주행하도록 계획하였다.

실험을 수행하기 위해 경계값 결정 실험을 먼저 수행하였다. 설정해주어야 할 경계값으로는 장애물이 점유하고 있는지를 판단하기 위한 격자확실성

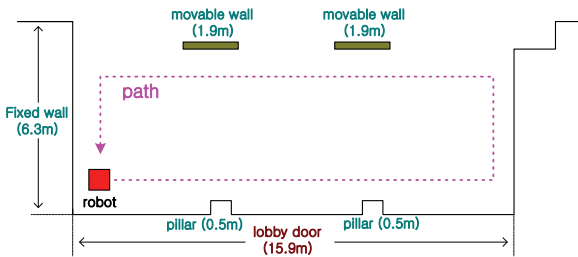


Fig. 12 The layout and robot path for the experiment

Table 1 Threshold of Experiment

	boundary value
CV	3
HT	7
IHT	80 (cm)
LST	100 (cm)

에 대한 경계값(CV)과 허프변환 후 직선으로 판단하기 위한 경계값(HT), 허프 역변환 후 생성된 직선 중 짧은 직선은 생략하기 위해 필요한 경계값(IHT), 전역지도에 융합된 직선 중 짧은 직선은 제거하기 위해 필요한 경계값(LST)등이 있다. 위에서 언급한 경계값들은 Table1에 나타내었다.

Fig 13에서 15은 실험 결과를 보여주고 있다. 이동로봇은 정해진 경로를 한번 주행한 후에 10개의 직선선분으로 이루어진 작업공간 지도를 작성하였다. 그러나 동일 경로를 두 번 주행한 후에는 8개의 직선선분으로 감소하였다. 이는 직선선분 융합 과정에서 선분들의 추가, 융합, 및 삭제 등 작업이 적절하게 이루어지고 있음을 보여 준다.

6. 결론 및 향후 연구 과제

본 논문에서는 초음파 센서를 이용하여 이동 로봇 주위의 일정한 범위내의 정보를 격자지도로 생성한 후 허프 변환을 하여 직선선분을 추출하였다. 추출된 직선은 제안된 알고리즘에 의해 중복검사, 방향검사, 정렬검사를 실시한 후 전체지도에 융합, 추가, 삭제를 판단하여 실시하였다.

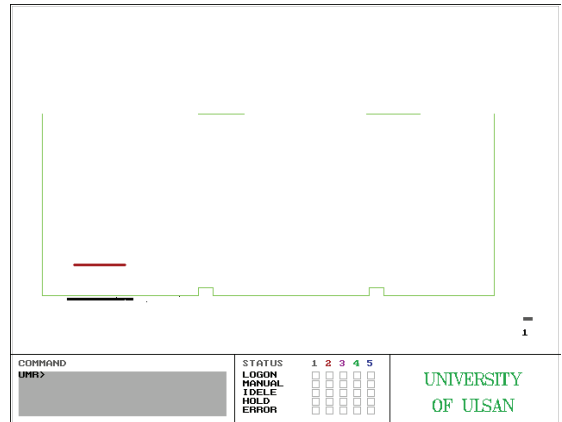


Fig. 13 Line segments after 20 seconds in first run

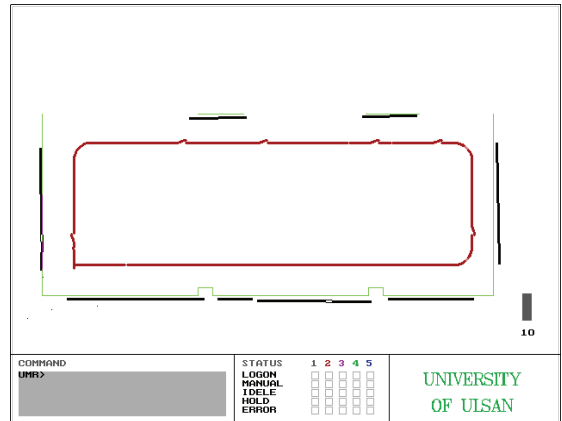


Fig. 14 Line segments after first run

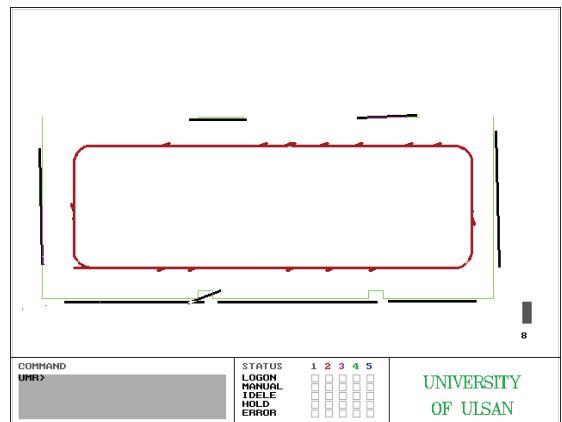


Fig. 15 Line segments after second run

실험 결과, 주행 중 얻어진 초음파 센서 데이터가 비록 오차를 포함한다 하더라도 정보 자체가 각각의 격자로 표현되므로 이를 허프 변환하여 직선선분으로 나타내고 전체지도와 결합될 때 오차들은 제거된다. 직선 선분을 생성할 때 여러 가지의 경계값들을 변화시켜 주어야 하는데 경계값들은 실험에 의해 결정하였다. 그리고 주행 중 작업 환경에 변화가 생겨 새로운 장애물이 생기거나 기존의 장애물이 없어진다 하더라도 직선에 확실성 값을 부여하여 지도를 생성하므로 제안된 방법은 직선의 확실성 값을 이용하여 전체 지도를 수정할 수 있다.

본 논문의 향후 과제는 생성된 지도에 벡터 개념을 도입하여 장애물의 테두리뿐만 아니라 장애물 점유 정보를 함께 저장하는 것이다. 또한, 장애물 점유 정보를 함께 저장한 지도를 이용하여 경로 계획을 어떻게 할 것인가에 대해 연구해야 한다.

REFERENCES

- (1) K. S. Chong, L. Kleeman, "Indoor Exploration Using Sonar Sensor Array : ADual Representation Strategy", IEEE Proc. IROS 97, pp676-682, 1997.
- (2) B. Yamauchi, A. Schultz, W. Adams "Mobile robot exploration and map-building with continuous localization", IEEE International Conference on, vol. 4, pp 3715-3720 1998.
- (3) J. Borenstein, Y. Koren, "Obstacle Avoidance with Ultrasonic Sensor" IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol.4, No.2, pp213-218, 1988.
- (4) J. L. Crowley, "World Modeling and Position Estimation for a Mobile Robot Using Ultrasonic Ranging" IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 674-680, 1989.
- (5) J. Gasos and A. Martin, "A fuzzy approach to build sonar maps for mobile robots" Computers in Industry, vol. 32, pp. 151-167, 1996.
- (6) Borenstein, Y. Koren,, "The vector field histogram - fast obstacle avoidance for mobile robots" *IEEE J. of Robotics and Automation*, vol. 7, pp. 278-288, 1991.
- (7) I. Urich, "The GuideCane - A Computerized Travel Aid for the Active Guidance of Blind Pedestrians", The thesis of Master of Science, Department of Mechanical Engineering and Applied Mechanics College of Engineering, The University of Michigan, 1997.
- (8) D. H. Ballard, C. M. Brown, "Computer Vision" PRESENT-HALL, INC. Englewood Cliffs, New Jersey, pp123 - P131 1982.
- (9) R. C. Smith, P. Cheeseman, "On the Representation and Estimation of Spatial Uncertainty" International Journal of Robotics Research, vol. 5, no. 4, pp. 56-68, Winter 1987.
- (10) J. L. Crowley, "Mathematical Foundations of Navigation and Perception For an Autonomous Mobile Robot" Tutorial at the Workshop on reasoning with uncertainty in robotics , University of Amsterdam, The Netherlands, 4 to 6 December 1995.