

## 이동로봇의 주변환경에 대한 직선선분 지도생성에 관한 연구

• 흥현주\*, 권석근\*, 노영식\*  
울산대학교 전기·전자 및 자동화 공학부\*

### A Study on Line Segment Map Building for Environment of Mobile Robot

• Hong Hyun-Ju\*, Kwon Seok-Geon\*, Ro Young-Shick  
\*Dept. of Electric Engineering, Ulsan University.

**Abstract** - 본 논문에서는 미지의 환경에서 이동 로봇이 주행 중 얻어진 격자지도(grid map)상의 장애물을 정보를 이용하여 이동 로봇 주변환경을 직선선분으로 표현한다. 격자지도의 장애물 정보는 초음파 센서를 이용하여 얻어지므로 이동로봇과 인접한 장애물 정보만을 얻게 된다. 얻어진 격자 정보를 호프변환을 이용하여 직선선분을 구축하고 이를 이전에 얻어진 직선선분과 결합하여 전체지도를 완성해 간다. 논의된 방법은 모의실험을 통하여 증명하였다.

#### 1. 서 론

이동 로봇이 장애물을 회피하면서 목표점까지 주행하기 위해서는 주위 환경을 인지하고 장애물에 대한 정보를 기록하여야 한다. 이를 지도 작성(Map Building)이라 한다. 하지만 주변환경과 장애물에 대한 자세한 정보를 기록하는 것이 주목적이 아니라면, 지도 작성에서 주요한 목적은 이동 로봇이 회피할 장애물의 적절한 표현이라고 볼 수 있다. 또한, 비록 주변환경 정보를 알고 있다 하더라도 주변 환경이 시간에 따라 변화하는 경우 새로운 정보를 획득하여 이전의 정보를 수정하여야 한다. 따라서 본 논문에서는 초음파 센서를 사용하여 일정한 작업공간을 격자지도로 생성한 후 직선 선분으로 표현하고 이를 다시 전체 지도와 결합하는 방법에 대해 설명한다[1].

이동 로봇에 사용되는 지도는 격자지도(grid map)와 모델 기반 지도(model-based map)로 분류 할 수 있다.[2] 격자지도는 초음파 센서나 적외선 센서 같은 근접센서들을 이용하여 장애물에 대한 정보를 격자로 구분한 작업공간상의 위치로 인식함으로서 표현된다. 모델 기반 지도는 공간을 평면, 모서리, 구석 등의 모델로 표현한 지도이다. 이런 표현 방법은 공간 내부의 위상학적 정보를 얻기 힘들기 때문에, 로봇이 이동 가능한 공간의 표현이 어렵다. 반면, 공간을 격자로 표현한 격자지도의 경우, 물체의 존재 유무만을 확률적으로 표현하고 있으므로 이동 가능한 경로를 얻어내기 쉽다. 그리고 격자지도는 센서의 측정 시 즉각적인 지도의 정보 수정이 이루어 질 수 있고, 불확실한 센서의 정보로도 물체의 존재 유무를 효율적으로 표시할 수 있다. 따라서 많은 논문들이 초음파 센서를 이용한 지도 작성이나 장애물 회피에 관한 주제를 언급하고 있다. 그러나 지도 작성 후 정보를 저장함에 있어서 격자지도는 주변 환경의 조건-장애물의 유무나 크기 등에 상관없이 전체 작업공간에 대한 정보 전체를 저장해야만 한다. 따라서 장애물의 조건에 상관없이 작업공간이 증가하면 저장해야 할 정보 또한 똑같이 증가하게 된다. 그리고, 센서의 부정확한 측정에 의하여 생성된 오차가 그대로 남아 있는 경우, 정보 그 자체가 정확하다고도 할 수가 없다. 그러므로 격자지도를 좀 더 효율적으로 이용하기 위해서는 지도 정보를 좀 더 간략화 하는 방법을 연구해야만 한다.[3]

본 논문에서는 실내 환경에서 이동 로봇 상부에 장착한 16개의 초음파 센서를 이용하여 실시간으로 얻어진

3.1m×3.1m내의 격자지도를 호프 변환을 이용하여 직선선분으로 표현한다. 일정한 범위내에서 얻어진 직선선분은 전체 지도와 결합하여 작업공간을 표시한다.

#### 2. 본 론

##### 2.1 초음파 센서에 의한 격자지도 생성

이동 로봇의 주변환경 지도를 생성하기 위해 사용되는 센서로는 초음파 센서, 적외선 센서, 레이저 센서, 시각 센서 등이 있다. 이 중 초음파 센서는 가격이 저렴하고 간단한 수식으로 거리를 계산할 수 있기 때문에 많이 사용된다. 초음파 센서는 가장 보편적이고, 일반적으로 사용되어지는 센서지만 그 장점 못지 않게 방향부정확성(Poor directionality), 판단오류(Cross talk), 거울반사(Specular reflections) 등의 단점을 가지고 있다. 지금까지 이를 보완하기 위해 여러 가지 방법이 연구되어 왔다. 본 논문에서는 이동 로봇의 상부에 30cm의 반지름을 가지는 원형 형태로 초음파 센서 16개를 15° 간격으로 장착하고, 최대 측정거리를 2m로 제한하였다.

격자지도를 생성하기 위하여 Iwan Ulrich가 제안한 방법을 이용하였다[4].

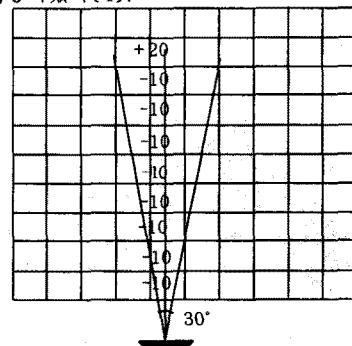


그림 1. 초음파 센서에 의한 격자 확실성 값 결정 방법

Iwan Ulrich은 이동 로봇을 위한 실시간 지도 작성을 위하여 Histogram In-Motion Mapping이라는 방법을 사용한다. 다른 방법에 비하여, 이 histogram 방법은 각 거리 정보에 대하여 histogram grid의 한 격자의 정보만 증가시킨다. 또한 이 histogram 방법은 로봇과 환경 정보가 증가된 격자 사이에 존재하는 격자들의 확실성 값을 감소시킨다. 또한 내부 샘플링에 의해 발생되는 오차를 보상하기 위하여, 성장을 발생기-growth rate operator(GRO)가 추가되었다. 만약 바로 옆의 근접한 격자가 높은 격자 확실성 값(cv)을 가지고 있다면 식(1)에 따라 GRO에 의해서 해당 격자는 더 많은 확실성 값을 갖게 된다. 그리고, 좀 더 나은 장애물 검출을 위하여 정면 센서에 대해서보다 옆면 센서에 대해 증가분을 더 주었다. 이 값은 단지 로봇의 옆면에 대해 더 영향을 주기 때문에, 주로 벽면 주행을 할

경우 잘못된 정보가 큰 영향을 주지 못한다. 간단히 말해서, HIMM은 장애물에 대한 격자의 높은 확실성 값을 만들고, 잘못된 정보나 장애물의 이동에 의해 증가된 격자의 확실성 값을 낮게 유지시킨다. 무엇보다도, 거리 정보가 즉각적으로 지도에 표현되며, 장애물 표현을 부드럽게 만들어 준다.

$$cv_{x,y} = cv_{x,y} + I^+ + \frac{cv_{x-1,y-1} + cv_{x-1,y} + cv_{x-1,y+1} + cv_{x,y-1}}{2} + \frac{cv_{x,y+1} + cv_{x+1,y-1} + cv_{x+1,y} + cv_{x+1,y+1}}{2} \quad (1)$$

$cv$  : certainty value  
 $x, y$  : 격자의 위치

## 2.2 직선선분 추출 및 결합

이동 로봇 주변의 격자지도를 생성한 후 이를 호프 변환하여 직선선분으로 나타낸다. 직선선분은 기존에 생성된 직선선분의 지도와 결합하여 전체 지도를 나타내어야 하므로 이를 전체 지도와 결합하는 알고리즘이 필요하다. 본 논문에서는 호프변환으로 생성된 직선선분과 전체지도를 결합하는 알고리즘을 제안한다.

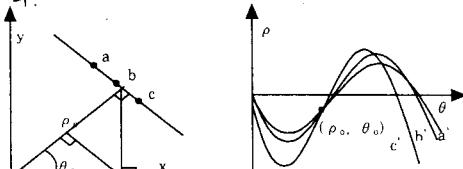
### 2.2.1 호프변환(Hough Transform)

호프 변환은 주로 컴퓨터 비전에서 이미지의 곡면을 검출하기 위해서 사용하는 방법이다.<sup>[5]</sup> 호프 변환을 위해서는 이미지 공간과 매개변수 공간을 필요로 한다. 호프 변환의 기본 개념은 이미지 공간상의 경계점 정보로부터 매개변수 공간의 대응점들의 가능 위치를 계산하고, 얻어진 정보를 이용하여 일정한 정보 적립 배열 내에 있는 매개변수 점들을 증가시키는 것이다. 그래서 얻어진 결과를 역변환하여 이미지에서 가장 근사한 곡면을 얻는다.

본 논문에서는 격자지도 정보를 이용하여 일정한 방향성을 가진 점유된 격자들의 조합을 호프 변환하여 직선선분으로 추출한다. 식(2)는 호프 변환의 매개 변수화를 위해서 극좌표계 표현 방식을 사용한 식이다.

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

이것은 고정된  $x, y$ 에 대하여  $(\rho, \theta)$  공간상에서  $\sin$  파를 생성한다. 따라서 극좌표계로 표현한 격자지도 정보는 호프 변환으로 직선의 교점과 방향성을 구할 수 있다.



(a) x, y 공간상의 각 점 a, b, c  
(b)  $\rho, \theta$  공간상의 각 점 a, b, c

그림 2. 호프변환의 일반적인 표현



(a) 이동 로봇 주변의 격자지도  
(b) 이동 로봇 주변의 격자지도에 대한 호프 변환

그림 3. 이동 로봇 주변의 격자지도와 호프변환

그림 3-(a)는 복도를 초음파 센서에 의해 얻어진 이동 로봇 주변의 격자지도이고, 그림 3-(b)는 그림 3-(a)의 격자지도를 호프 변환한 모습이다. 그림 3-(b)에서 두 곳의 교차점을 찾을 수 있다. 교차점을 호프 역변환하여

직선을 찾는다..

### 2.2.2 직선선분(Line Segment)

격자지도를 직선선분으로 표현하기 위해서는 직선선분에 대한 정의가 필요하다. 직선의 방정식에서 파라미터 값들은 전역좌표계를 기준으로 생성된다.<sup>[6]</sup>

일반적인 직선의 방정식은 식(3)으로 주어진다.

$$ax + by + c = 0 \quad (3)$$

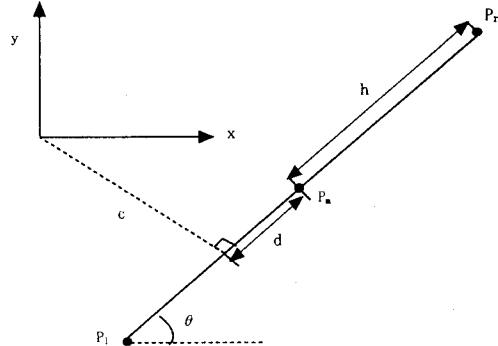


그림 4. 직선선분의 구성

각 파라미터에 대한 정의는 다음과 같다.

- $P_m$  : 외부 좌표계에서 직선 성분의 중점( $x, y$ )
- $\theta$  : 직선 성분의 방위
- $h$  : 직선 성분의 중간 길이
- $\sigma_\theta$  : 방위에서의 불명확성(기준 편차)
- $\sigma_c$  : 직선 성분에 대한 수선 위치에서의 불명확성
- $a, b$  :  $a = \sin(\theta), b = -\cos(\theta)$
- $c$  : 원점에 대한 수직 거리.  $c = -ax - by$
- $d$  : 가로지른 수선으로부터 직선 성분의 중심점에 대한 원점까지의 거리
- $P_r$  : 직선 성분의 오른쪽 끝점( $x, y$ )
- $P_l$  : 직선 성분의 왼쪽 끝점( $x, y$ )
- CF : line segment의 확실성(confidence factor)

여기서 CF는 새로운 직선이 생성되면 3으로 초기화하고, 새로운 직선이 기존의 직선과의 중복검사를 통과하면 1 감소시키고 기존 직선과 결합되면 기존 직선의 CF값을 2 증가시킨다. CF는 최대 15가 넘지 않도록 설정하고 CF값이 3보다 적거나 생성된 직선들 중 1m 미만의 직선은 지운다.

### 2.2.3 직선선분 결합 (Line Fusion)

호프 역변환으로 생성된 새로운 직선선분은 전체지도와 결합하여야 한다. 전체지도와 결합하기 위해 본 논문에서는 다음과 같은 방법을 제안한다.

#### 1) 직선선분 생성(Make a New Line Segment)

호프 역변환에 의한 직선선분  $P_r, P_l$  값을 이용하여 그 이외의 직선 파라미터값들을 계산한다.

#### 2) 중복 검사(Overlap test)

직선  $c$ 는 st3와 end3사이의 각을 2등분하는 직선으로 주어지며, 직선  $a, b$ 와 직선  $C$ 가 만나는 점은  $p_1(x_1, y_1)$ ,  $p_2(x_2, y_2)$ 이다. 여기서 식(4)를 만족하면 3)을 수행한다

$$(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 < 2.5 * (\sigma_c + \sigma_{c'}) \quad (4)$$

만약  $p_1, p_2$ 가 생성되지 않거나 위 조건을 만족하지 않는다면 기존에 저장된 다른 직선선분과  $b$ 직선을 이용하여 2)를 다시 수행한다.

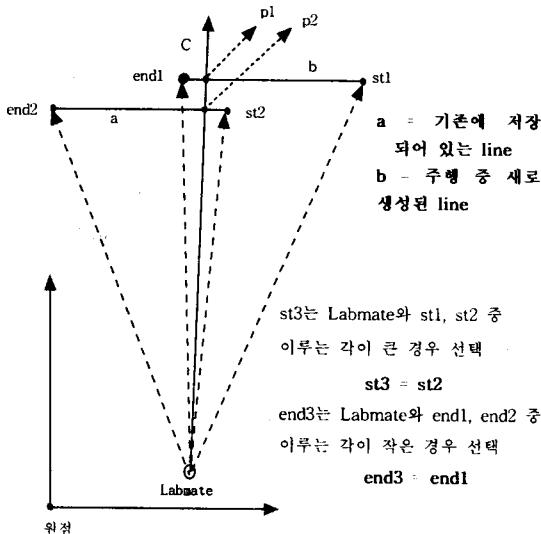


그림 5. Overlap test

### 3) 방향성 검사(Orientation test)

두 직선 a, b의 방향성을 검사한다. a 직선의 파라미터는  $(a_1, b_1, c_1, \theta_1, \sigma_{\theta_1}, \sigma_{c_1})$ 로 표기하고, b 직선의 파라미터는  $(a_2, b_2, c_2, \theta_2, \sigma_{\theta_2}, \sigma_{c_2})$ 로 표기한다.

$$(\theta_1 - \theta_2) \leq 2 * (\sqrt{\sigma_{\theta_1}} + \sqrt{\sigma_{\theta_2}}) \quad (5)$$

위의 조건을 만족하면 4)를 수행하고 그렇지 않으면 2)를 다시 수행한다.

### 4) 정렬 검사(Alignment test)

3)의 test를 만족하면 두 직선은 방향이 같은 새로운 직선이 생성된다. 따라서 새로운 직선의 방향성을 계산하기 위해  $k_o$  값을 구한다.  $k_o$ 는 방향성에 대한 확실성을 부여하는 파라미터이다.

$$k_o = \frac{\sigma_{\theta_1}}{(\sigma_{\theta_1} + \sigma_{\theta_2})} \quad (6)$$

$$\theta_1 = \theta_1 - k_o * (\theta_1 - \theta_2)$$

$$\sigma_{\theta_1} = \sigma_{\theta_1} - k_o * \sigma_{\theta_2}$$

$$a_1 = \sin(\theta_1)$$

$$b_1 = -\cos(\theta_1)$$

$$c_1 = -a_1 * x_{m_1} - b_1 * y_{m_1}$$

최신정보로 수정된 파라미터 값을 이용하여 정렬검사를 수행한다. 정렬검사는 파라미터  $c$ 값을 이용하여 (8)식으로 검사한다.

$$c_{err} = c_1 + a_1 * x_{m_2} + b_1 * y_{m_2} \quad (8)$$

$$c_{err} \geq 2 * (\sqrt{\sigma_{c_1}} + \sqrt{\sigma_{c_2}})$$

(8)식을 만족하면 5)를 수행하고 그렇지 않으면 2)를 다시 수행한다.

### 5) 직선선분 결합 (Line Fusion)

3가지 검사를 모두 만족하면 두 직선은 하나의 직선으로 결합하여야 한다. 먼저 결합하기 전에 정렬검사를 통과했으므로  $k_c$  값을 이용하여 두 직선이 결합된 새로운 직선의 파라미터를 구한다.  $k_c$ 는 정렬성에 대한 확실성을 부여하는 파라미터이다.

$$k_c = \frac{\sigma_{c_1}}{(\sigma_{c_1} + \sigma_{c_2})} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{c_1} &= \sigma_{c_1} - k_c * \sigma_{c_2} \\ x_{err} &= x_{m_2} - x_{m_1} \\ y_{err} &= y_{m_2} - y_{m_1} \\ x_{m_1} &= x_{m_1} + k_c * x_{err} \\ y_{m_1} &= y_{m_1} + k_c * y_{err} \end{aligned} \quad (10)$$

(7)식과 (10)식에서 구한 직선의 파라미터 값을 이용해서 직선의 좌우 끝점을 구할 수 있다. 따라서 a, b 두 직선의 좌우 끝점 중 최좌측과 최우측 끝점을 선택한다. 선택된 끝점들은 식 (11)에 의해 결합된 직선의 좌우 끝점으로 계산된다.

$$\begin{aligned} x &= xb^2 - yab - ac \\ y &= -xab + ya^2 - bc \end{aligned} \quad (11)$$

여기서 점  $(x, y)$ 가  $ax + by + c = 0$ 에 수직으로 만나는 그을 때 수직선과 직선이 만나는 교점의 좌표는  $(x, y)$ 이다. 식(11)을 이용하면 결합된 최종의 직선을 구할 수 있다.

### 6) Add and Delete Line Segment

1)에서 새로 생성된 직선이 기존의 직선과 결합되지 않으면 새로운 직선으로 등록하고, CP값이 3보다 작거나 직선의 길이가 1m보다 작다면 지운다.

### 2.3 모의실험

모의 실험에 사용된 로봇모델의 파라미터는 TRC사의 LABMATE 제원을 이용하였다.

표 1. 이동 로봇 모델 파라미터

크기	40cm×40cm
바퀴간 거리(T)	34.3cm
초음파센스 측정 거리	2m
속도	50cm/s
Sampling time	0.1s
초음파센스 갯수	16개(15° 간격)
로봇의 인지 범위	± 120°

모의 실험 환경은 350×350의 Cell 개수를 가지고 Cell 하나의 크기는 10cm×10cm이다. 작업 공간은 직선분으로 된 가상의 복도를 사용하였다. 사용된 주행 알고리즘은 [7]에서 사용된 것으로 장애물을 회피 할 수 있는 경로를 생성하여 복도 끝을 한바퀴 돌고 되돌아 오도록 하였다.

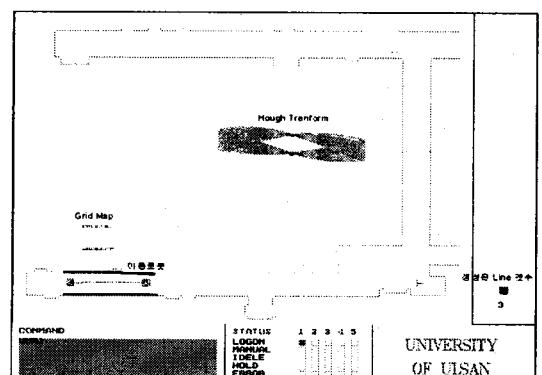


그림 6. 처음 30초 동안 주행한 결과

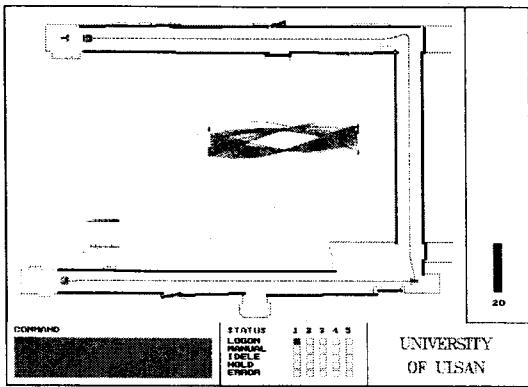


그림 7. 목표점까지 주행한 결과

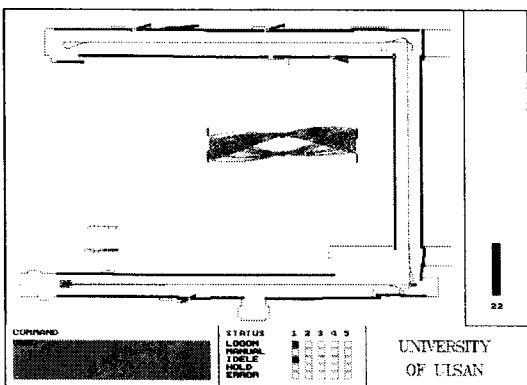


그림 8. 작업공간 완주 후 결과

작업공간에서 이동 로봇이 주행하면서 생성하는 직선선분은 굵은 실선으로 표시하였으며, 가상으로 만들어진 복도는 실선으로 표시하였다. 그리고 로봇이 주행한 주행경로는 점선으로 표시하였다. 화면의 오른쪽 하단에 표시된 숫자는 주행 중 생성된 직선의 개수를 표시한다. 그림 6, 7, 8은 제안된 방법의 모의 실험 결과들이다. 실시간으로 얻어진  $31 \times 31$  Cell 크기의 격자지도를 이용해서 호프 변환한 후 새로운 직선을 생성하고 이를 전체지도에 결합해 가는 것을 볼 수 있다. 그림 6은 처음 30초간 주행 후 결과로 2개의 직선선분을 생성하였으며, 그림 7은 복도 끝을 한바퀴 돌기 전의 모습이다. 생성된 직선의 개수는 20개이고, 문턱이 있는 곳은 초음파 센서의 특성상 직선이 사선으로 생성되는 것을 알 수 있다. 그림 8은 작업공간 완주 후의 모습으로 생성된 직선의 개수는 22개이다. 문턱쪽을 살펴보면 그림 7과는 달리 직선이 새로 생성되거나 수정된 것을 볼 수 있다.

### 3. 결론

본 논문에서는 초음파 센서를 이용하여 이동 로봇 주위의 일정한 범위내의 정보를 격자지로로 생성한 후 호프 변환을 하여 직선선분을 추출하고 추출된 직선선분과 전체지도를 결합하였다.

모의 실험 결과, 주행 중 얻어진 초음파 센서 데이터가 비록 오차를 포함한다 하더라도 정보 자체가 각각의 격자로 표현되므로 이를 호프 변환하여 직선선분으로 나타내고 전체지도와 결합될 때 오차들은 제거된다. 그리고 주행 중 작업환경에 변화가 생겨 새로운 장애물이 생기거나 기존의 장애물이 없어진다 하더라도 직선에 확실성 값을 부여하여 지도를 생성하므로 제안된 방법은 효율적

으로 전체 지도를 작성한다.

본 논문의 향후 과제는 작업 공간 전체 내를 주행 할 수 있는 주행 제어기를 이용하여 실제 실험을 통한 직선선분의 생성이다.

### [참 고 문 헌]

- [1] James 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.
- [2] John J. Leonard, Hugh F. Durrant-Whyte, directed Sonar Sensing for Mobile Robot Navigations, Kluwer Academic Publisher, 1992
- [3] 서남일, "이동 로봇을 위한 초음파 센서 기반의 주변환경 지도 생성에 관한 연구", 울산대학교 석사학위논문, 1999
- [4] Iwan Urich, "The GuideCane - A Computerized Travel Aid for the Active Guidance of Blind Pedestrians" The degree of Master of Science, Department of Mechanical Engineering and Applied Mechanics College of Engineering, The University of Michigan, 1997.
- [5] Dana H. Ballard, Christopher M. Brown "Computer Vision" PRESENT-HALL, INC. Englewood Cliffs, New Jersey, P123 - P131 1982.
- [6] Crowley, J.L., and F. Ramaparany, Mathematical Tools for Manipulating Uncertainty in Perception, "AAAI Workshop on Spatial Reasoning and Multi-Sensor Fusion", Kaufmann Press, October, 1987
- [7] 이운근, "자율 이동 로봇을 위한 이동 명령 시스템에 관한 연구", 울산대학교 석사학위 논문, 1992.