

선분지도를 이용한 이동로봇의 동적 경로 생성

권석근*, 홍현주*, 노영식*, 이운근**
*울산대학교 전기전자정보시스템공학부, **부산경상대학교

Dynamic Path Generator Using Line Segment Based Map

Seok-Geun Kwon*, Hyun-Ju Hong*, Young-Shick Ro*, Un-Kun Yi**
*School of Electrical Engineering, Ulsan University, **Busan Gyeongsang College

Abstract - 알려지지 않은 환경에서 이동로봇이 목표점까지 이동하기 위해서는 외계센서를 이용하여 장애물을 인식하여 충돌 없이 주행할 수 있는 능력이 있어야하고 또한 인식된 장애물을 지도정보로 저장하여야 한다. 이렇게 생성된 지도정보를 이용하여 최적의 경로를 실시간으로 계획하면서 목표점까지 도달하여야 한다. 본 논문에서는 초음파 센서로 알려지지 않은 환경을 인식하여 선분지도를 생성하면서 생성된 선분지도를 이용하여 동적으로 최적의 경로계획을 위한 경로생성에 대하여 방법을 제시한다. 또한 실제 환경에서 모의실험을 통하여 실시간으로 경로계획이 가능함을 확인하였다.

1. 서 론

자율 주행이 가능한 이동로봇이 기본적으로 갖추어야 하는 능력은 장애물과의 충돌 없이 목표 지점까지 이동하는 것이다. 여기서 부가적으로 요구되는 능력들은 작업영역 내에서 이동로봇의 정확한 자신의 위치를 파악하는 위치보정 능력, 이동로봇의 작업영역 내에서 환경을 인식하고 지도를 작성하는 지도작성 능력, 그리고 알려진 지도, 작성된 지도, 이동 중 발견된 장애물에 의해 변경된 지도를 이용하여 목표 지점까지 이동할 수 있는 최단거리를 찾아내는 경로계획 능력 등이 있다. 여기서 지도 작성과 경로계획은 서로 밀접한 관계가 있다.

장애물이 존재하는 작업영역 내에서 이동로봇의 최적 경로를 구하는 문제는 많은 연구가 진행되어 왔으나, 이들 연구결과에 따르면, 경로계획을 위해서 작업환경에 대한 완벽한 정보가 요구된다. 이러한 제약성 때문에 미지의 환경에는 직접 적용될 수 없는 제한성을 가진다. 따라서 이동로봇의 경로계획에서의 접근방법은 장애물을 포함한 미지의 작업환경에서 목표지점이 주어졌을 경우 최적의 경로를 구하는 문제로 축약될 수 있다.[1] 미지의 환경에 대한 정보가 전혀 없거나 부분적인 정보만을 이용해 이러한 문제를 해결하는 하나의 방법은 센서 데이터들을 이용하여 환경지도를 작성하는 것이다. 물론 센서의 부정확성이나 잡음으로 인한 문제와 지도 작성시 센서 데이터간의 매칭 문제 등이 발생하지만 이러한 문제를 해결하고자 하는 연구도 진행되어 왔다.[2-4] 지도 작성의 방법은 크게 그래프 모델과 그리드 기반 모델로 나뉜다. 그래프 모델은 자유 공간 영역의 정보와 특징점들로 표현되는 장애물들을 도식화함으로써 작업환경을 나타내는 방법으로 환경을 표현하는데 적은 양의 메모리만 필요하나 정확한 센서의 정보를 필요하다는 단점이 있다. 반면에 그리드 기반 모델은 작업환경을 일정한 셀로 나누어 장애물이 있는 셀과 없는 셀로 표현하는 방법이며,[3] 이 방법은 많은 양의 메모리를 필요로 하는 단점이 있으나 센서의 부정확성 등의 문제에 크게 영향을 받지 않고 실질적으로 쉽게 환경지도를 작성할 수 있다.

본 논문에서는 초음파 센서의 부정확성 등의 문제에

크게 영향을 받지 않고 쉽게 환경지도를 작성할 수 있는 그리드 기반 지도를 작성하고, 적은 양의 메모리를 필요로 하는 그래프 모델인 선분지도로 변환하여 작성한다. 이 선분지도를 사용하여 동적으로 최적의 전역 경로로 생성하는 방법을 제시한다.

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 못지않게 방향 부정확성 (Poor directionality), 판단 오류(Cross talk), 거울 반사(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 15개를 15° 간격으로 장착하고, 최대 측정거리를 2m로 제한하였다. 격자지도를 생성하기 위하여 Iwan Ulrich가 제안한 방법을 이용하였다.[5]

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 전체 지도를 결합하는 알고리즘을 사용하였다.[6]

2.2.1 호프변환(Hough Transform)

호프 변환은 주로 컴퓨터 비전에서 이미지의 곡면을 검출하기 위해서 사용하는 방법이다.[7] 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 직선 성분으로 추출한다. 식(1)은 호프 변환의 매개 변수화를 위해서 극좌표계 표현 방식을 사용한 식이다.

$$\rho = x \sin \theta + y \cos \theta \quad (1)$$

이것은 고정된 x, y에 대하여 (ρ, θ) 공간상에서 sin파를 생성한다. 따라서 극좌표계로 표현한 격자지도 정보는 호프 변환으로 직선의 교점과 방향성을 구할 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.[8] 일반적인 직선의 방정식은 식(2)로 주어진다.

$$ax + by + c = 0 \quad (2)$$

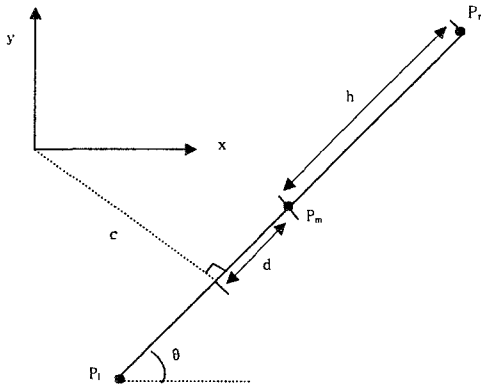


그림 1. 직선선분의 구성

각 파라미터에 대한 정의는 다음과 같다.

- P_m : 외부 좌표계에서 직선 성분의 중점(x,y)
- θ : 직선 성분의 방위
- h : 직선 성분 길이의 1/2
- σ_θ : 방위에서의 불명확성(표준 편차)
- σ_c : 직선 성분에 대한 수직 위치에서의 불명확성
- a, b : a = sin(θ), b = -cos(θ)
- c : 원점에 대한 수직 거리. c = -ax - by
- d : 가로지른 수직으로부터 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 CF 값을 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 c는 st3와 end3사이의 각을 2등분하는 직선으로 주어지며, 직선 a, b와 직선 C가 만나는 점은 p1(x₁,y₁), p2(x₂,y₂)이다. 여기서 식(3)을 만족하면 3)을 수행한다.

$$(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 < 2.5 * (\sigma_{c_1} + \sigma_{c_2}) \quad (3)$$

만약 p1, p2가 생성되지 않거나 위 조건을 만족하지 않는다면 기존에 저장된 다른 직선선분과 b직선을 이용하여 2)를 다시 수행한다.

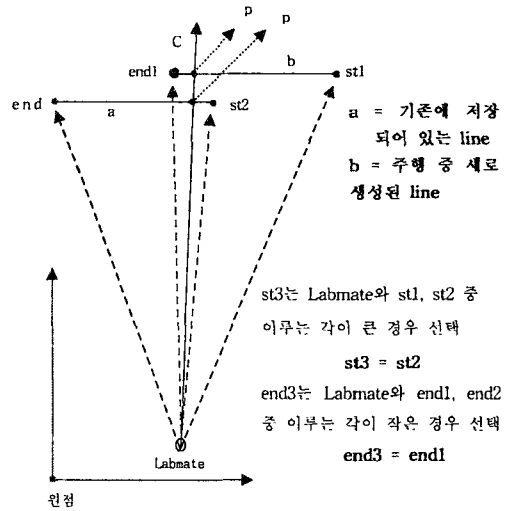


그림 2. Overlap test

3) 방향성 검사(Orientation test)

두 직선 a, b의 방향성을 검사한다. a 직선의 파라미터는 (a₁, b₁, c₁, θ₁, σ_{θ₁}, σ_{c₁})로 표기하고, b 직선의 파라미터는 (a₂, b₂, c₂, θ₂, σ_{θ₂}, σ_{c₂})로 표기한다.

$$(\theta_1 - \theta_2) \leq 2 * (\sqrt{\sigma_{\theta_1}} + \sqrt{\sigma_{\theta_2}}) \quad (4)$$

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

4) 정렬 검사(Alignment test)

3)의 test를 만족하면 두 직선의 방향성을 최신정보로 수정하여 정렬검사를 수행한다. 정렬검사는 파라미터 c 값을 이용하여 (5)식으로 검사한다.

$$c_{err} = c_1 + a_1 * x_{m_2} + b_1 * y_{m_2} \\ c_{err} \geq 2 * (\sqrt{\sigma_{c_1}} + \sqrt{\sigma_{c_2}}) \quad (5)$$

(5)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 직선의 정렬성을 수정한다.

수정된 직선의 좌우 끝점을 구하여 기존의 직선과 비교하여 최좌측과 최우측 끝점을 선택한다. 선택된 끝점들은 식 (6)에 의해 결합된 직선의 좌우 끝점으로 계산된다.

$$\dot{x} = xb^2 - yab - ac \\ \dot{y} = -xab + ya^2 - bc \quad (6)$$

(여기서 점 (x,y)를 지나고 ax+by+c=0에 수직으로 만나는 직선을 그을 때 수직선과 직선이 만나는 교점의 좌표는 (ẋ, ẏ)이다.) 식(6)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, CF값이 3보다 작거나 직선의 길이가 1m보다 작다면 지운다.

2.3 선분지도상의 경로생성

2.3.1 초기 경로 생성 방법

가시그래프(visibility graphs)는 최적의 전역 경로 계획을 위한 유용한 표현방법 중의 하나이다. 그러나 아래 그림 3과 같이 장애물의 개수가 증가할수록 이동할 수 있는 경로가 기하급수적으로 증가하기 때문에 계산량이 크게 증가하는 단점이 있다.

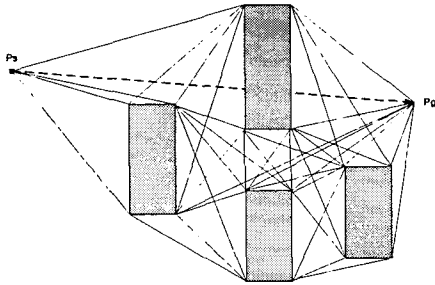


그림 3. 가시 그래프

본 논문에서 이런 단점을 개선하기 위해 최적경로 탐색의 계산량을 줄일 수 있는 개선된 가시그래프를 제안한다. 개선된 가시그래프 생성에 사용되는 각 변수에 대한 정의는 다음과 같다.

- Ps/Pg : 전역 출발/목표 지점
- Pf/Pt : 국부 출발/목표 지점
- P1, P2 : 선분지도의 시작점과 끝점
- Pa, Pb, Pc, Pd : 확장된 선분지도의 각 점

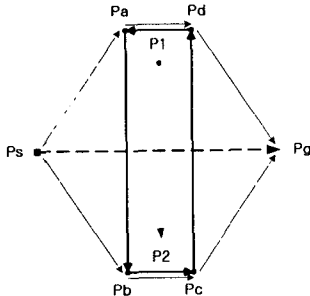


그림 4. 선분지도상의 그래프 구조

개선된 가시그래프 생성 방법은 스택을 이용하여 그래프 작성한다. 사용되는 함수는 3가지이다. 계산을 위해 임시 저장하는 Push() 함수, 경로 연결 가능 여부를 계산하기 위해 저장된 두 노드의 값을 불러오는 Pop() 함수, 그리고 연결 가능하다고 평가되었을 경우 이동 가능한 경로로써 연결을 시키는 Link()가 있다. 여기서 dir은 경로생성과정에서 방향을 의미하는 것으로 "-1"은 좌측변면, "1"은 우측변면, "0"은 직진을 나타낸다. 이 함수들을 사용하여 초기 경로를 생성하는 절차는 아래와 같다.

```

Push(Pg, Ps, dir);
Push(Ps, Pg, dir);
Push(&Pf, &Pt, &dir);
while (not empty stack)
{
    if (dir = 0 and PfPt와 교차하는 선분지도)
        Push(P1, Pt, 1);
        Push(P2, Pt, -1);
        Push(P1, Pg, 0);

```

```

Push(P2, Pg, 0);
Push(Pf, P1, 0);
Push(Pf, P2, 0);
else if (dir = 1 or dir = -1)
    px = FindNextPoint()
    dir = FindNextDirection()
    Link(Pf, Px)
    Push(Px, P2, dir);
else
    Link(Pf, Pt)
}
Pop(&Pf, &Pt, &dir);

```

그림 5와 같이 장애물을 표현한 선분이 3개가 있을 때, 초기 경로생성 방법에 의해 작성된 가능한 경로를 보여주고 있다.

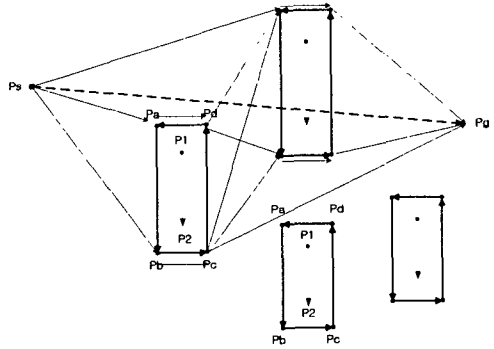


그림 5. 선분지도에서의 경로생성

그림 5에서 작성된 경로를 보면, 선분 $\overline{P5P6}$ 은 경로 계산에서 제외되어 계산량을 줄일 수 있음을 알 수 있다.

2.3.2 최적경로 탐색

초기 경로가 작성되면, 최적의 경로를 탐색하는 과정이 필요하다. 본 논문에서는 A* 알고리즘을 사용하였으며, 가중치는 직선거리를 사용하였다. 동적으로 경로 계획하기 위해 모든 연결 경로에 대한 가중치를 계산하지는 않는다. 그 이유는 이동로부터 계획된 경로를 따라 목표 지점으로 이동함으로써 이동경로 중간에서 장애물에 대한 정보를 확인하게 되어 새로운 장애물 정보가 발생했을 때는 동적 경로계획을 수행하면 되기 때문이다.

2.4 동적 경로생성

경로를 따라 이동 중에 장애물 정보에 의한 지도가 변경되면 다음과 같이 2가지 상황에 대해 동적으로 경로 계획을 수행한다.

2.4.1 새로운 선분지도 생성

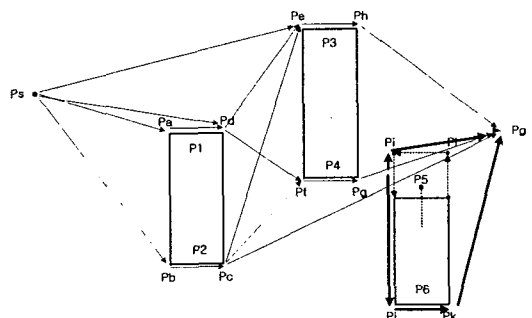


그림 6. 새로운 선분지도 생성

이동로봇이 경로 \overline{PcPg} 의 이동경로에서 장애물에 대한 선분($\overline{P5P6}$) 지도가 생성되면, 초기경로 생성방법과 같은 방법으로 계산을 수행한다. 동적 경로를 생성하기 위해서 스택에 저장되는 노드는 다음과 같다.

```

Push(Pi, Pg, I);
Push(Pj, Pg, -I);
Push(&Pf, &Pt, &dir);
while (not empty stack)

```

경로생성 후 최적의 경로를 탐색하기 위한 가중치 계산은 새로 생성된 경로에 대해서만 다시 계산을 수행한 후 가중치가 적은 경로를 따라 이동한다.

2.4.2 선분지도 정보 변경

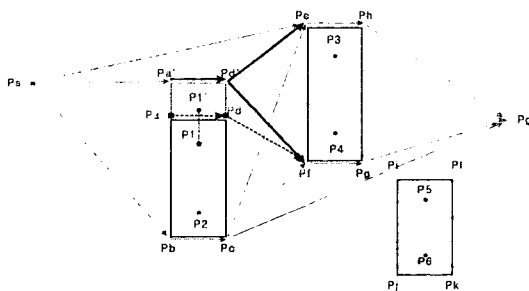


그림 7. 선분지도 정보 변경

이동로봇이 경로 $\overline{P5Pa}$ 의 이동경로에서 장애물에 대한 선분($\overline{P1P2}$) 지도가 연장이 되면, 노드 Pa, Pd가 변경되므로 경로 \overline{PaPd} , \overline{PdPe} , \overline{PdPf} 의 가중치를 수정하여 가중치가 적은 경로를 따라 이동한다.

2.3 모의실험

모의실험에 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	15개(15°간격)
로봇의 인지 범위	±120°

모의 실험 환경은 선분지도의 작성을 위한 Cell 하나의 크기는 10cm×10cm이다. 작업 공간은 직선선분으로 된 가상의 넓은 실험실을 사용하였다. 작업공간에서 이동로봇이 주행하면서 생성하는 직선선분은 굵은 실선으로 표시하였으며, 가상으로 만들어진 장애물(벽, 책상)은 실선으로 표시하였다. 그리고 로봇이 주행한 주행경로는 점선으로 표시하였다. 실시간으로 얻어진 31×31 Cell 크기의 격자지도를 이용해서 호프 변환한 후 새로운 직선을 생성한다.

회의용 책상을 배치하여 양쪽 책상에 대한 지도 정보는 미리 주어지고 중앙에 있는 책상의 정보가 없는 상태에서 이동로봇을 목표 지점까지 주행한 결과를 그림 8에서 보여주고 있다.

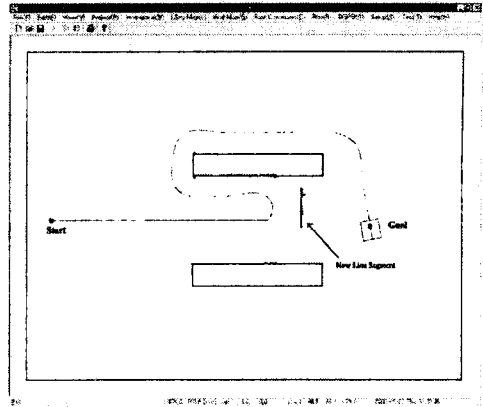


그림 8. 새로운 선분지도 생성

그림 8의 모의실험 결과에서 이동로봇은 초기 경로 생성에서 목표 지점까지의 직선 경로에 장애물이 없다고 알고 있기 때문에 직선 주행한다. 그러나 경로상에 장애물이 검출되어 장애물 회피를 하면서 직선의 선분지도가 생성된다. 이때 추가된 선분지도에 대해 동적으로 경로가 변경되어 목표지점까지 도달할 수 있는 것을 볼 수 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 초음파 센서를 이용하여 작성된 선분지도를 이용하여 계산량을 줄일 수 있는 전역 경로 생성 방법을 제안하였고, 또한 이 방법으로 이동로봇이 이동 중에 장애물 정보가 변경되더라도 실시간으로 지도를 생성하면서 동적으로 경로를 계획할 수 있음을 모의실험을 통하여 입증하였다. 향후 과제로는 본 논문에서 제안한 알고리즘을 실제 이동로봇의 주행에 적용시켜 실제 환경에서의 유용성을 검증하여야 한다.

[참 고 문 헌]

- [1] A. M. Thompson, "The Navigation System for the JPL Robot," Proc. Joint Conf. Artificial Intell., pp. 749-757, 1977.
- [2] R. Chatila and J. P. Laumond, "Position Referencing and Consistent World Modeling for Mobile Robot" in Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp. 138-145, 1985.
- [3] H. P. Morevec and A. Elfes, "High Resolution Maps from Wide Angle Sonar", in Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp. 116-121, 1985.
- [4] J. L. Crowley, "Navigation for an Intelligent Mobile Robot", IEEE J. Robotics Automation, Vol. 1, No. 1, pp. 21-41, 1985.
- [5] Iwan Ulrich, "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.
- [6] H. S. Hong, S. G. Kweon, Y. S. Ro, "Line Segment Map Building Using Sonar for Mobile Robot", Journal of Control, Automation and Systems Eng. Vol. 7, No. 9, pp. 783-789, 2001.
- [7] Dana H. Ballard, Christopher M. Brown "Computer Vision" PRESENT HALL, INC., Englewood Cliffs, New Jersey, pp. 123-131, 1982.
- [8] Crowley, J.L., and F. Ramparany, "Mathematical Tools for Manipulating Uncertainty in Perception", AAAI Workshop on Spatial Reasoning and Multi Sensor Fusion", Kaufmann Press, October, 1987.