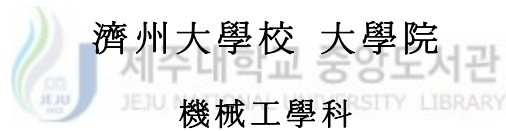


碩士學位論文

그리드 지도의 방향정보를 이용한
형상지도 작성에 관한 연구



濟州大學校 大學院
機械工學科

金 在 喆

2004年 12月

그리드 지도의 방향정보를 이용한 형상지도 작성에 관한 연구

指導教授 林 鍾 桓

金 在 喆

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2004年 12月



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

金在喆의 工學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 _____ 印

委 員 _____ 印

委 員 _____ 印


濟州大學校 大學院

2004年 12月

A Study on Building a Feature Map Based on
the Orientation Information in a Grid Map

Jae-Cheol Kim

(Supervised by professor Jong-Hwan Lim)

 제주대학교 중앙도서관
A thesis submitted in partial fulfillment of the requirement
for the degree of Master of Engineering

Department of Mechanical Engineering
GRADUATE SCHOOL
CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

December 2004

목 차

SUMMARY	ii
I. 서론	1
II. 그리드 지도 작성	4
2.1 초음파 특성	4
2.2 그리드 지도 형성	8
2.3 방향 정보 평가	10
III. 형상 기준 지도 작성	13
3.1 클러스터 형성	13
3.2 직선 성분 추출	15
3.3 직선 성분 융합	18
IV. 실험 및 결과	22
4.1 실험환경 및 방법	22
4.2 실험 결과	26
V. 결론	34
VI. 참고문헌	36

SUMMARY

The vital functions for mobile robot navigation are representation of a robot's environment, localization, and path planning. In most cases, representation of environment can be a basis of localization and path planning because it can provide the information on the location of objects. Building a sonar map by using sonar sensor is the most popular approach to representation of the environment.

There are two different approaches for building a sonar map; a grid map and a feature map. The grid map can effectively accumulate sonar informations into occupancy probabilities of grids from series of sonar data so that it can overcome the corner problem of sonar sensing. It requires large amount of memories to represent a wide work space. On the other hand, the feature map is composed of some geometric primitives such as lines, corners or edges, and arc features that can provide useful information for localization and path planning. In addition, the use of memories for maintaining a wide environmental map is minimized. However, It need densely sampled data to evaluate features from the environment. Accordingly, it is desirable to develop a method that incorporates the advantages of a grid map into a feature map.

This thesis suggests a new approach that converts the grid map to a feature map. The scenario of the approach is as follows; the robot

continuously builds a local grid map using sonar sensor in a wide workspace. While the occupancy probability of a grid is updated from sonar range data, the orientation of the grid is also evaluated. The grids in the map is clustered in to groups in which the grids have the same orientations. From the groups, the line segments is, then, extracted by using least square method. Finally, the line segments that satisfies given constraints are merged into one to build a feature map.

The proposed approach consists of following methods; evaluation of orientations, clustering method of orientation, extraction of line segments, and merging of line segments. These are strongly based on the orientation information of grids. Evaluation of orientation is possible because of the specular reflection of sonar sensing, that is, the sonar beam can detect an object only when the incidence angle is normal to the object surface. The proposed approach was verified through sets of experiments with a real robot in a real world. The results have shown the possibility that the approach can be applied to build a feature map from a grid map.

I. 서론

환경인식, 위치 추적 및 경로계획은 이동로봇의 자율항해를 위한 가장 기본적인면서도 필수적인 기능이다. 이 중 환경인식은 위치 추적 및 경로계획의 기초 정보를 제공할 수 있다는 점에서 무엇보다도 중요하다. 환경인식은 로봇에 장착된 환경인식용 센서의 정보로부터 로봇의 주위에 대한 지도를 형성하는 방법이 주로 이용된다[1,2].

지도 형성에는 비전 센서와 초음파 센서가 주로 이용된다. 비전 시스템은 풍부한 환경정보를 제공하기는 하지만 거리정보를 직접적으로 얻기 힘들뿐만 아니라 정보처리에 많은 시간이 요구되며 비경제적이다. 반면에 초음파 센서는 값이 싸고, 사용이 간편하며, 거리정보가 직접적으로 이용가능하기 때문에 널리 쓰이는 센서중 하나이다.

그러나 초음파 센서는 대부분의 실제 물체에 대해서 거울 효과(Specular Reflection)가 발생하므로 센서 정면에 가장 가까운 물체가 감지되지 못하고 여러 번 다른 물체에 반사되는 다중반사 경로 현상이 발생한다[3-5]. 거울효과는 초음파 센서가 물체에 입사되어 반사할 때 정반사의 법칙을 따르기 때문에 발생한다. 따라서 초음파 센서는 물체의 거리와 방향에 대해 큰 불확실성을 갖고 있어서 형성된 지도의 질이 낮아 충분한 위치 정보를 줄 수가 없다. 이와 같은 초음파 센서의 문제점인 거울효과를 해결하기 위한 초음파 지도를 형성하는 방법은 크게 그리드 지도와 형상지도로 나누어진다.

그리드 지도는 로봇의 활동 공간을 2차원의 작은 그리드로 나누고 각 그리드에 물체가 존재할 확률을 할당하는 방법이다[6-10]. 즉, 초음파 센서의 거리

정보가 입수될 때 마다 각 그리드의 점령확률을 연속적으로 갱신함으로써 초음파 정보의 불확실성에도 불구하고 실제 물체가 존재하는 그리드의 점령확률이 궁극적으로 높아진다는 것에 근거한 방법이다. 실제 적용에서 그리드 지도는 초음파 정보가 누적됨에 따라 빈공간과 물체가 존재하는 공간이 잘 구분되는 결과를 보이고 있다[2]. 그러나 이 방법은 그리드의 크기에 따라 지도의 해상도가 달라질 뿐만 아니라 지도 형성 및 유지에 요구되는 메모리 량이 지나치게 과다하다는 단점이 있다.

형상지도는 물체의 구체적인 형상 즉, 평면, 모서리, 원형 등으로 주위 환경을 표현하는 방법이다[11]. 이 방법은 초음파 정보를 개별적으로 이용하지 않고 정보사이의 연관성을 판단하여 그 연관성으로부터 구체적인 형상을 추출하여 지도를 작성한다. 형상 기준 지도는 각 형상이 위치 및 방향에 대한 구체적인 정보를 갖고 있으므로 로봇항해에 필수적인 위치 추적 및 위치 재평가에 그리드 지도보다 더 효과적이다[5,11]. 그러나 이 방법은 초음파 정보의 상호 연관성을 필요로 하기 때문에 로봇이 한 위치에서 360° 전 방향에 대한 스캐닝 데이터가 필요하다. 그로인해 정보획득에 많은 시간이 요구된다. 또한 초음파 센서의 거울효과로 인해 코너부분의 형상이 감지되지 못하는 단점이 있다.

최근 이 두 가지 형태의 지도 작성법의 장점을 결합하는 방법으로 그리드 형태의 지도로부터 형상지도를 구성하는 방법이 연구되고 있다[11,12]. 이 방법들은 그리드 지도로부터 Hough 변환을 이용하여 직선성분을 추출하는 방법이다. 그러나 Hough 변환은 하나의 직선성분은 쉽게 추출이 가능하지만 다수의 직선이 혼합된 경우에는 효과적이지 못하다[13]. 또한 추출된 직선성분의 양 끝점을 결정하지 못하는 단점이 있다. 또한 이 방법은 메모리 사용량이

많고 계산시간이 길어져 실시간 적용이 어렵다.

본 연구에서는 그리드 지도의 방향확률을 이용하여 형상지도를 형성하는 방법을 제안한다. 이 방법은 초음파 센서를 이용하여 그리드 지도를 형성할 때 각 그리드의 방향확률을 동시에 평가하여 지도를 형성한다. 형성된 그리드 지도로부터 방향확률이 동일한 그리드 들을 분류하여 클러스터를 형성한 다음, 각 클러스터를 대상으로 최소자승법을 이용하여 선분을 추출한다. 추출된 각 선분들은 적당한 조건을 설정하여 그 조건에 해당되는 선분 끼리 하나로 통합하여 최종적으로 형상지도를 형성한다.

본 연구에서 제안하는 세부 접근방법은 그리드 지도의 방향정보 평가, 동일 방향을 갖는 그리드의 클러스터 형성, 클러스터로부터 직선성분 추출, 그리고 추출된 직선성분들의 통합 및 코너형상 재구성 방법 등이다. 이와 같은 방법은 기본적으로 그리드의 방향 정보를 이용하는데, 이 방향정보는 초음파 센서의 단점인 거울반사효과를 이용함으로써 추출이 가능하다. 즉, 초음파 센서는 물체의 표면에 수직하게 음파가 입사되는 경우에만 그 물체를 감지하므로 감지된 물체의 방향정보를 얻을 수 있다.

2장에서는 초음파 센서의 특성과 베이지안 모델을 이용하여 그리드 지도를 형성함과 동시에 그리드의 방향정보 평가 방법을 제시한다. 평가된 방향확률을 이용하여 클러스터를 형성하고 각 클러스터로부터 직선성분을 추출하는 방법 및 선분통합 방법은 3장에서 기술한다. 마지막으로 4장과 5장에서는 실제 로봇을 이용한 실험결과 및 결론을 제시한다.

II. 그리드 지도 작성

2.1 초음파 특성

초음파 센서는 초음파 트랜스듀서를 사용하여, 초음파 빔을 발사한 후 물체에 반사되어 돌아오는 초음파가 수신되기까지의 소요시간을 측정하여 장애물과의 거리를 측정하는 센서이다. 이때 반사되어 돌아오는 초음파는 공기 중의 퍼짐 효과와 소리의 공기 중 회절 효과로 시간이 지남에 따라 그 크기가 감소한다. 초음파 센서는 이를 보정하기 위하여 시변 이득 증폭기를 사용한다.

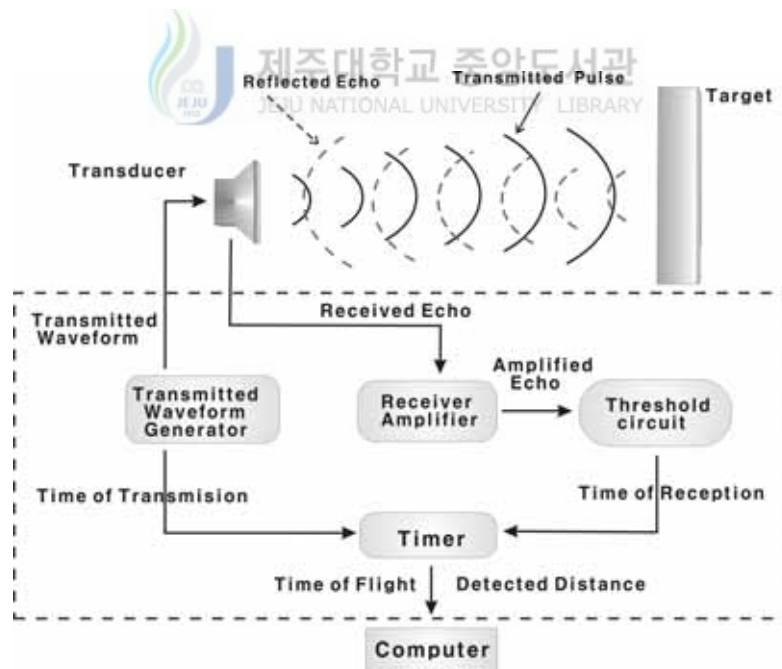


Fig. 2-1 Ultrasonic sensor

즉, 시간의 흐름에 따라 이득이 커지는 증폭기를 사용하여 공기 중에서 약해진 초음파의 크기를 보상해 준다. Fig. 2-1은 초음파의 원리를 나타낸다. 초음파센서는 초음파 펄스를 발사하여 그 음파가 물체의 표면에서 반사, 산란되어 되돌아오기까지의 시간을 측정함으로써 그 물체의 거리를 측정한다. 즉, 공기 중에서 음파의 전달 속도(c)는 1기압에서는 다음과 같다.

$$c = 331.4\sqrt{T/273} \text{ [m/ sec]} \quad (2-1)$$

여기서 T는 절대온도이다. 음파의 왕복 전달시간이 t초 라 하면 그 사이의 거리(L)은 다음과 같이 구해진다.

$$L = \frac{1}{2} \times c \times t \text{ [m]} \quad (2-2)$$

보통 공기 중에서 거리 측정에 사용되는 초음파 주파수는 25kHz~200kHz 정도 이며, 이동로봇용으로는 주로 40kHz~50kHz정도를 사용한다.

그러나 반사형의 초음파 거리 센서를 이용하는 경우에 대상 물체의 반사 특성이 큰 문제가 된다. 대상 물체의 표면이 비교적 매끈한 경우는 음파가 전부 정반사가 일어나므로 음파의 진행 방향에 대해 경사가 있는 면에서는 조사한 초음파가 전부 반사되어 수신센서의 방향으로 되돌아오지 않아 물체가 감지되지 못하는 경우가 있는데 이것을 거울효과라 한다 [2] . 일반적으로 파의 정반사 유무는 다음과 같은 Reyleigh 이론에 의하여 결정된다[14,15].

$$H < \frac{\lambda}{8 \cdot \sin\beta} \quad (2-3)$$

여기서 H 는 물체의 평균 거칠기, λ 는 파장, 그리고 $\beta=(\pi/2-\text{입사각})$ 이다. 이론에 따르면, 40kHz~50kHz 초음파 센서의 경우 표면 평균 거칠기가 0.0025m 이하인 경우 정반사가 발생하므로 일반적인 실내 환경에서 물체들은 대부분 거울 효과가 발생한다.

이와 같은 거울효과는 전방의 가장 근접한 물체를 감지하지 못하는 경우가 발생한다. 첫 번째는, 음파가 흡수가 심한 물체의 표면에서 반사될 때 강도가 떨어져 수신기에 감지되지 못하는 경우이다. 두 번째는, 물체의 표면에 입사된 음파가 센서 중심축에 대해서 수직하지 않은 물체 표면에서 반사된 후, 수신기와는 다른 쪽으로 진행되는 경우인데, 이 경우를 다중반사 경로현상이라 한다. 이와 같은 현상은 물체의 표면이 음파의 파장에 비해 아주 매끄러워 거울반사를 일으키기 때문에 일어난다. 이와 같은 다중반사 현상은 Fig. 2-2와 같이 반사된 파가 수신기로 되돌아오지 않는 경우와, 여러 번의 반사를 거친 후에 수신기에 감지되는 경우로 나뉘어진다. 두 경우 모두 가장 근접한 물체를 인식하지 못하며, Fig. 2-3과 같이 허상이 생기는 문제가 발생한다.

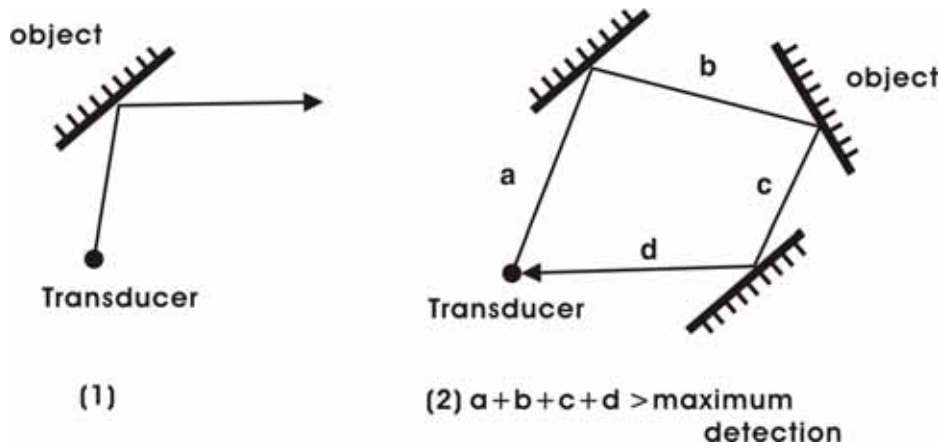


Fig. 2-2 The beam is reflected away from the transducer or the distance traveled by the beam is longer than the maximum detection range.

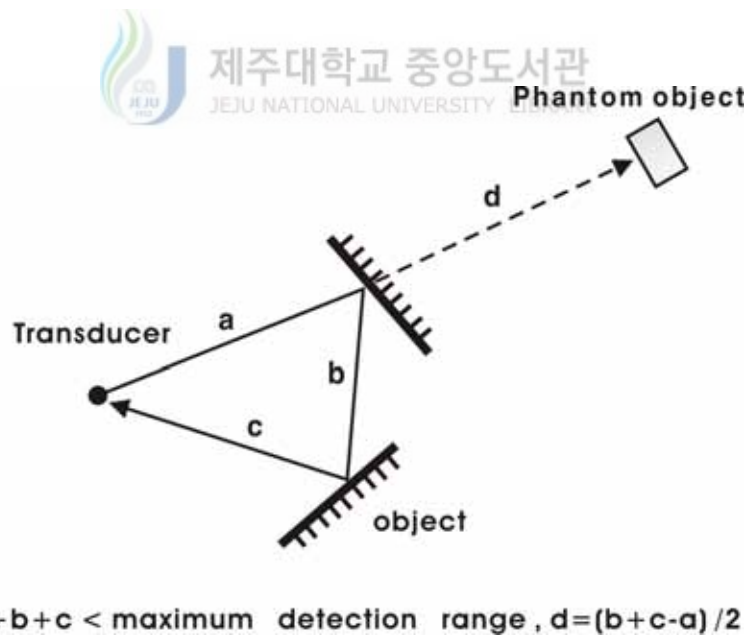


Fig. 2-3 The beam is returned after multiple reflection by many objects.

2.2 그리드 지도 형성

그리드형태의 지도는 Fig. 2-4와 같이 대상 공간을 2차원으로 근사하고 전체 공간을 여러 개의 그리드로 나눈 다음 각 물체들이 존재하는 위치의 셀에 일정한 값을 주어 표현한 것이다. 각 셀들은 물체에 의해 점령되어 있을 확률이 할당되는데, 이 확률을 센서로부터 물체 위치에 대한 상대 거리정보를 이용하여 평가하게 된다.

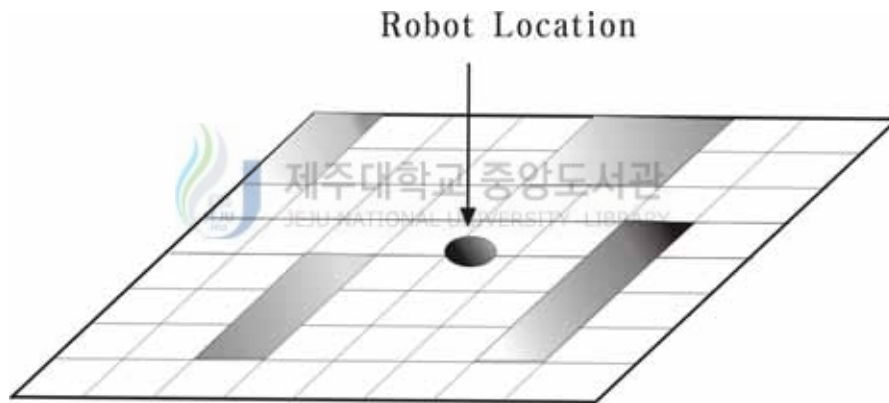


Fig. 2-4 Certainty grid representation.

정밀한 주행제어 및 위치 추적이 이루어지기 위해서는 정밀도가 높은 지도 작성이 필요하며, 따라서 그리드의 크기를 가능한 작게 해야 한다. 그러나 로봇의 메모리에는 한계가 있으며, 그리드의 크기가 작아질수록 필요한 메모리량이 늘어 나므로, 넓은 영역을 하나의 지도로 작성하기는 어렵다.

이러한 문제는 로봇 주위의 일정한 부분만을 대상으로 국부지도를 작성함으로써 해결될 수 있다.

국부지도는 Fig. 2-5와 같이 로봇의 현재 위치를 중심으로 일정한 윈도우 내부만을 대상으로 하여 고해상의 지도를 형성하며, 지도의 중심은 로봇의 중심과 일치한다. 이 국부지도는 로봇이 진행함에 따라 같이 이동하며 각 그리드의 확률 값도 같이 이동된다. 로봇은 항상 국부지도의 중앙에 위치하며 국부지도는 기준좌표계에 대해 방향이 일정하게 유지되고 로봇이 상대적으로 방향을 바꾼다.

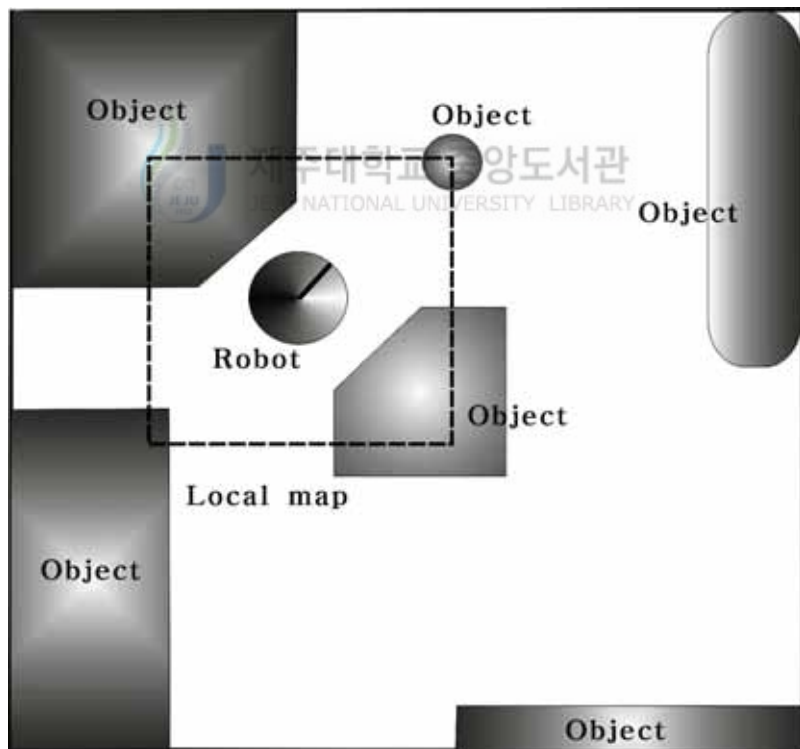


Fig. 2-5 Configuration of local Map

초음파 센서의 거리정보는 신뢰성이 극히 낮으며 이를 직접적으로 이용할 경우 효과적인 지도 작성이 어렵다. 이러한 단점을 해결하기 위해 개발된 방법이 MBM모델이다[2]. 이 MBM모델은 Moravec[8,16]이 제안한 원래의 모델보다 훨씬 효과적이지만 여전히 많은 메모리와 계산시간을 요구된다. 따라서 실시간 지도 작성을 위해 MBM 모델을 단순화 시킨 SMBM [2]모델을 이용하여 지도를 작성한다.

2.3 방향 정보 평가

초음파 센서의 거울반사 효과는 정보의 신뢰성이나 지도 작성 측면에서는 단점이 되지만 각 셀의 방향을 평가하는 측면에서는 아주 효과적인 특성이라 할 수 있다. 즉, 빛과 같이 거울반사가 일어나지 않는 센서의 경우는 어떤 셀에 물체가 있다고 할 경우 빛은 사방으로 반사가 일어나기 때문에 그 셀이 속하는 물체의 표면방향을 평가하기는 어렵다. 그러나 초음파 센서는 입사각과 반사각이 같다는 정반사의 법칙을 따르므로 물체의 표면에 거의 수직방향이 아니면 감지되지 않으므로 이 특성을 이용하여 쉽게 각 셀의 방향정보를 얻을 수 있다. 본 연구에서는 이와 같은 초음파 센서의 특성을 이용하여 각 그리드의 방향정보를 평가한다.

초음파센서가 M_t 및 M_{t+1} 위치에서 Fig. 2-6과 같은 측정값이 발생했다고 가정하자. 먼저 M_t 위치의 측정으로부터 그리드 i 의 방향은 기준좌표계의 x 축과 그리드 i 의 중심을 향하는 선분과의 사이 각 A_t 로 평가할 수 있다.

이 A_t 의 가중치를 $W_{t,i}$ 라 하자. $W_{t,i}$ 는 다른 그리드와 독립적이며 그리드 i 에 전달되는 음파의 강도에 의존한다고 가정할 수 있다. 이것을 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$W_{t,i} = P_r(r_t)P_\theta(\theta_t) \quad (2-4)$$

여기서 $P_r(\cdot)$ 와 $P_\theta(\cdot)$ 는 각각 센서와 물체사이의 거리와 각도에 따른 음파의 강도를 나타내는 확률 값이다[4]. 이제 새로운 정보 M_{t+1} 이 들어오고 Fig. 2-6과 같이 그리드 i 가 다시 점령영역 내에 속한다고 가정하자. M_{t+1} 만 고려하면 그리드 i 의 방향은 $A_{new,i}$ 가 된다.

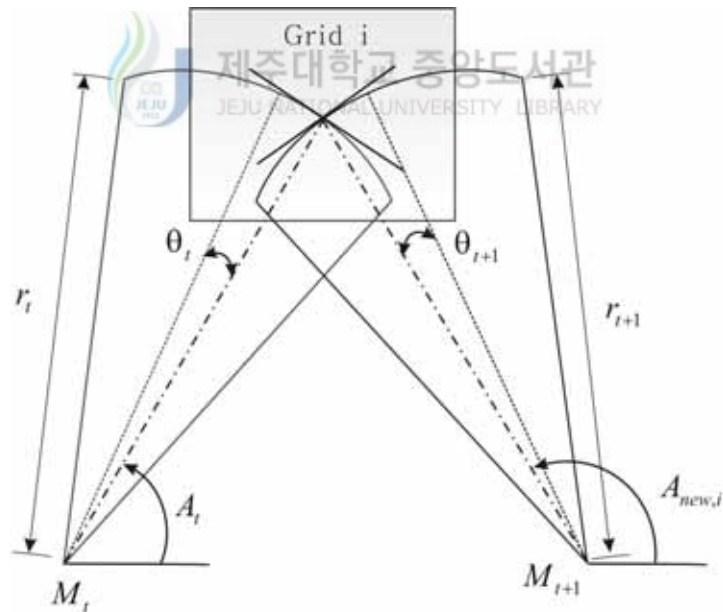


Fig. 2-6 Schematic diagram of measurements and the orientation of a grid.

이제 M_t 와 M_{t+1} 을 동시에 고려하여 새로운 방향을 갱신하는 가장 단순하면서도 타당성 있는 방법은 두 개의 각도, A_t 와 $A_{new,i}$ 의 가중치평균이다. 즉,

$$A_{t+1} = \frac{A_t W_{t,i} + A_{new,i} W_{new,i}}{W_{t,i} + W_{new,i}} \quad (2-5)$$

여기서 $W_{new,i}$ 는 A_{t+1} 의 가중치로서 다음과 같다.

$$W_{new,i} = P(r_{t+1})P(\theta_{t+1}) \quad (2-6)$$

두 정보를 동시에 고려한 A_{t+1} 의 새로운 가중치 $W_{new,i}$ 는 그 그리드 내에서 축적된 정보의 양을 의미한다고 볼 수 있으므로 다음 같이 나타낼 수 있다.

$$W_{t+1,i} = W_{t,i} + W_{new,i} \quad (2-7)$$

즉, 그리드 i 의 방향에 대한 새로운 가중치 값은 모든 과거가중치정보의 합이다. 이와 같은 방법으로 점령영역내의 모든 그리드는 각각의 새로운 정보가 들어올 때마다 방향정보가 갱신된다. 비점령영역 내 그리드들의 방향정보는 국부지도 내에서 단지 점령영역의 그리드들만으로 계산되어지기 때문에 갱신할 필요가 없다.

Ⅲ. 형상 기준 지도 작성

3.1 클러스터 형성

2장과 같이 국부 지도의 각 그리드의 점령확률뿐만 아니라 물체의 방향정보를 평가하고 이 점령확률 및 방향정보를 이용하여 직선선분을 추출한다. 국부지도가 형성된 공간에는 실제 다수의 직선 성분이 존재할 수 있으며 그 직선에 해당하는 그리드들이 점령그리드로 평가되어 있다. 따라서 점령확률만으로는 각 직선 성분을 구별할 수가 없다. 이와 같은 다수의 점령 그리드로부터 각 직선성분을 추출하기 위해서는 먼저 동일 직선 성분에 대응되는 그리드들을 그룹화 하여야 한다. 본 연구에서는 이와 같은 문제를 해결하기 위해 지도 내의 그리드들은 각각의 방향확률 값들에 따라 클러스터를 형성하는 방법을 개발하였다. 각 클러스터는 특정한 방향 값에 대해 각 그리드의 방향 값이 일정한 오차범위 내에 존재하는 그리드들의 집단이다. 이때 클러스터 중심 값은 그 클러스터에 속하는 그리드들의 방향들의 평균값으로서 정의된다. 하나의 지도에서 클러스터의 수는 그 국부지도를 구성하고 있는 물체의 선분의 수와 같으며, 중심의 값은 기준 좌표계에 대한 대응되는 선분의 방향이 된다. 그러나 선분의 방향은 기준좌표계에 대하여 로봇이 항상 각도 오차를 가지므로 의미가 없으며, 단지 선분들 사이의 상대각도는 물체의 형상에 대한 정보를 제공한다. 방향정보로부터 클러스터를 형성하는 방법은 다음과 같다. 임의의 그리드 i 의 방향을 Q_i 라 하고, k 번째 클러스터의 중심을 C_k , 그리고 동일 클러스터 내에 방향의 최대오차, 즉 하나의 클러스터에 대한 각도의 범

위를 D_T 라 할 때 다음과 같은 단계를 거쳐 클러스터를 형성한다.

1 단계 : 초기 클러스터 수는 1, 중심 값은 0 으로 설정한다.

2 단계 : 지도내의 각각의 점령 그리드에 대하여, 그 그리드의 방향확률과 현재까지 생성된 모든 클러스터 중심과의 차를 계산하고 그 중 최소가 되는 클러스터가 k 라면 $D_{\min}(= \min |O_i - C_k|)$ 을 구하고 다음의 과정을 수행한다.

(a) 만약 $D_{\min} \leq D_T$ 이면 O_i 는 k 번째 클러스터에 속하고 O_i 를 고려한 새로운 C_k 값을 구한다.

(b) 만약 $D_{\min} \geq D_T$ 라면 O_i 는 새로운 클러스터 중심이다.

O_i 를 새로운 클러스터 중심 값으로 설정하고 클러스터 수를 1 만큼 증가시킨다.

이 과정을 지도내의 모든 점령그리드에 대해 수행한다.

3 단계 : 만약 어떤 두 클러스터의 중심 값이 C_T (클러스터 사이의 최소 중심 값 차) 보다 작으면 다음 식을 이용하여 두 클러스터를 병합하고 새로운 중심을 구한다.

$$C_{\text{merge}} = \frac{C_1 N_1 + C_2 N_2}{N_1 + N_2} \quad (3-1)$$

4 단계 : 새로운 클러스터가 형성되지 않을 때 까지 위의 2와 3단계를 반복한다.

이와 같은 클러스터링 과정을 통하여 각 클러스터의 중심은 실질적인 직선 선분의 방향 값으로 점차 이동할 것이다.

각 클러스터에 대한 각도 오차범위 D_T 는 초음파 센서의 유효 감지 각도로부터 발생한다. 즉, 초음파 센서는 이론적으로 전 방향으로 전파되지만 물체 감지가 가능한 음파의 각도 폭은 일반적으로 $20^\circ \sim 30^\circ$ 정도이다. 따라서 동일 직선을 감지할 수 있는 센서의 각도 범위도 거울효과를 고려할 때 $20^\circ \sim 30^\circ$ 정도 이므로 그 직선에 해당되는 각 그리드의 방향 값 차가 기타 오차를 고려할 때 $20^\circ \sim 30^\circ$ 보다 크게 된다. 같은 이유로 클러스터 중심 사이의 최소 값 C_T 는 D_T 보다는 큰 값을 가져야 한다. 이는 이와 같은 방법으로 구분할 수 있는 각 직선 형상의 최소 각도 차가 C_T 가됨을 의미한다.



3.2 직선 선분 추출

형성된 각 클러스터의 방향 값은 각각 대응되는 선분의 방향을 나타낸다고 볼 수 있으므로 각 클러스터별로 독립적으로 직선 선분을 평가한다. 직선선분 평가는 동일 클러스터에 속하는 그리드의 위치에 대해 최소자승법을 이용하여 최적의 직선방정식을 구하는 방법을 이용한다.

최소자승법이란 데이터들이 이루고 있는 함수를 찾아내는데 있어서 함수와 데이터 간의 오차를 최소로 하는 식을 구하는 방법이다. 하나의 클러스터를 형성하는 다수의 점령 그리드를 대표하는 형상의 함수식을,

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_nx^n \quad (3-2)$$

이러 정의 하고, Y_i 를 그리드 i 의 y 위치라 할 때 실제 값과 찾고자하는 식의 값과의 사이의 오차 e_i 는 다음과 같이 정의 된다.

$$e_i = Y_i - y_i = Y_i - a_0 - a_1x_i - a_2x_i^2 - \dots - a_nx_i^n \quad (3-3)$$

여기서 x_i 는 그리드 i 의 x 위치이다. 각 그리드의 오차의 제곱의 합은 다음과 같다.

$$S = \sum_{i=1}^N e_i^2 = \sum_{i=1}^N (Y_i - a_0 - a_1x_i - a_2x_i^2 - \dots - a_nx_i^n)^2 \quad (3-4)$$

여기서 N 은 클러스터에 속하는 점령그리드의 수이다. (3-4)로 정의된 오차를 최소화 하는 계수 a_i 는 다음과 같이 구한다. 즉, 식 (3-4)를 각 계수에 대해 미분하여 그 값을 0으로 놓으면 다음과 같이 $n+1$ 개의 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial S}{\partial a_0} = 0 = \sum_{i=1}^N 2(Y_i - a_0 - a_1x_i - \dots - a_nx_i^n)(-1)$$

$$\frac{\partial S}{\partial a_1} = 0 = \sum_{i=1}^N 2(Y_i - a_0 - a_1x_i - \dots - a_nx_i^n)(-x_i)$$

$$\vdots \quad (3-5)$$

$$\frac{\partial s}{\partial a_n} = 0 = \sum_{i=1}^N 2(Y_i - a_0 - a_1 x_i - \dots - a_n x_i^n)(-x_i^n)$$

위의 식들을 다시 정리하면 다음의 식을 얻을 수 있다.

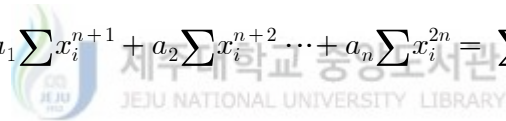
$$a_0 N + a_1 \sum x_i + a_2 \sum x_i^2 + \dots + a_n \sum x_i^n = \sum Y_i$$

$$a_0 \sum x_i + a_1 \sum x_i^2 + a_2 \sum x_i^3 + \dots + a_n \sum x_i^{n+1} = \sum x_i Y_i$$

$$a_0 \sum x_i^2 + a_1 \sum x_i^3 + a_2 \sum x_i^4 + \dots + a_n \sum x_i^{n+2} = \sum x_i^2 Y_i \quad (3-6)$$

\vdots

$$a_0 \sum x_i^n + a_1 \sum x_i^{n+1} + a_2 \sum x_i^{n+2} + \dots + a_n \sum x_i^{2n} = \sum x_i^n Y_i$$



계수행렬을 $A = [a_0, a_1, \dots, a_n]^T$ 로 정의하고 식 (3-6)을 행렬로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} N & \sum x_i & \sum x_i^2 & \dots & \sum x_i^n \\ \sum x_i & \sum x_i^2 & \sum x_i^3 & \dots & \sum x_i^{n+1} \\ \sum x_i^2 & \sum x_i^3 & \sum x_i^4 & \dots & \sum x_i^{n+2} \\ \vdots & & & & \vdots \\ \sum x_i^n & \sum x_i^{n+1} & \sum x_i^{n+2} & \dots & \sum x_i^{2n} \end{bmatrix} A = \begin{bmatrix} \sum Y_i \\ \sum x_i Y_i \\ \sum x_i^2 Y_i \\ \vdots \\ \sum x_i^n Y_i \end{bmatrix} \quad (3-7)$$

위의 식에서 A 를 제외한 나머지 행렬의 각 요소들은 클러스터 내의 그리드들의 위치로부터 구해지는 상수이므로 계수 행렬 A 를 구할 수 있다. 본 논문에서는 직선성분만이 대상이므로 식 (3-2)를 직선으로 가정하고 위의 이론을 적용한다.

3.3 직선 성분 융합

직선선분 평가 알고리즘을 실제로 적용해보면 실제 동일 직선선분이 여러 개의 선분으로 나뉘어 형성되는 경우가 많으며 코너(corner) 부분은 제대로 감지되지 못하는 경우가 발생한다. 동일 평면이 여러 개의 선분으로 나타나는 것은 로봇의 위치오차 및 각도 오차 그리고 센서의 거리오차와 각도오차에 의해 동일 평면이지만 감지된 거리와 각도가 달라져 다른 선분으로 표현되기 때문이다. 또한 코너 부분은 초음파 센서의 특성상 다중반사경로현상이 심하게 발생되므로 잘 형성되지 않는다. 이러한 문제점을 보완하기 위해 다음과 같은 방법으로 형성된 지도의 물체를 재구성한다.

Fig. 3-3와 같이 로봇이 평가한 두 선분의 방향벡터를 각각 \hat{n}_1, \hat{n}_2 라 하고 \hat{n}_1 과 평행한 방향을 X 축으로 하는 좌표계에 대해 각 선분의 양단 좌표가 그림과 같다고 할 때 다음 조건을 모두 만족하면 이 두 선분을 하나의 직선으로 간주하여 통합한다.

조 건 1. $|x_{12} - x_{21}| \leq \delta_w$

조 건 2. $\cos^{-1}(\hat{n}_1 \cdot \hat{n}_2) \leq \delta_\theta$

조 건 3. $|y_{21} - y_{12}| \leq \delta_d$

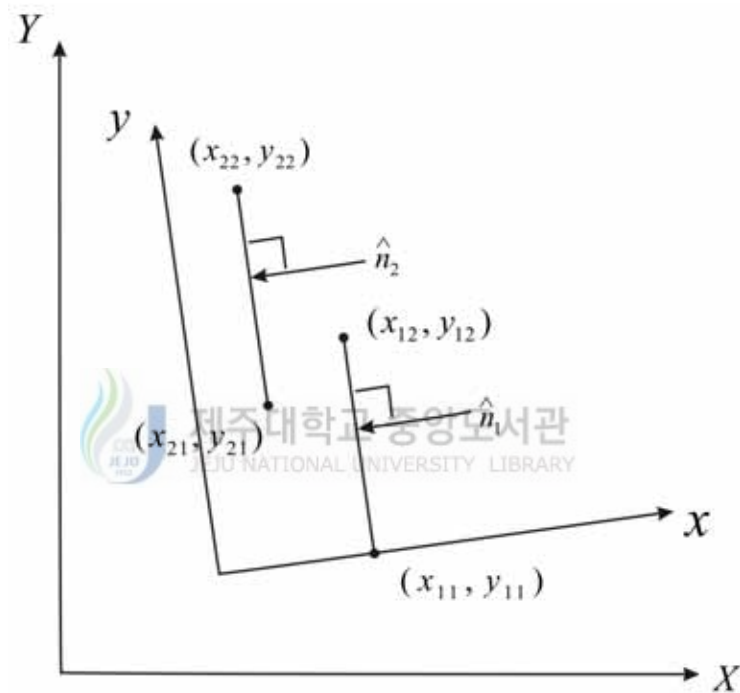


Fig. 3-3 Merging two line segments

여기서 δ_w 는 두 선분사이의 x 방향 최대거리, δ_θ 는 로봇의 각도오차와 센서의 각도오차를 고려한 상수이며, δ_d 는 로봇이 통과할 수 있는 두 물체 사이의 최소거리이다.

δ_d 가 이와 같이 정의된 이유는 로봇의 주행에서 실제로 두 선분 사이에 물

체가 존재하지 않더라도 로봇 입장에서는 그 사이를 통과 할 수 없으므로 물체가 존재하는 것과 같은 효과가 되기 때문이다. 만약 항해가 목적이 아니라 물체의 윤곽 재구성이 목적일 때는 두 선분을 통합시킬 필요가 없으며 다만 $(y_{21} - y_{12})$ 의 값이 음일 때는 두 선분이 겹쳐지므로 통합시킨다.

분리된 선분을 하나로 통합한 후 이것으로부터 코너 부분을 재구성 할 수 있다. 물체의 꼭지점은 모서리와 코너로 구분된다. 코너는 꼭짓점이 주위 물체에 비해 돌출된 형상이므로 잘 감지가 되기 때문에 특별히 재구성 할 필요가 없다. 그러나 코너의 경우는 전술한 바와 같이 거의 감지되지 못하므로 선분들을 연장해서 재구성해야한다.

모서리와 코너를 구분하는 방법은 다음과 같다. Fig. 3-4와 같이 두 개의 선분 l_1 과 l_2 의 방향을 \hat{n}_1, \hat{n}_2 라 할 때 A, B 그리고 C가 이루는 삼각형내의 임의의 점 F를 잡아 이 점에서 각 선분에서 이 점을 향하는 방향이 각각 \hat{n}_1 과 \hat{n}_2 가 일치하면 점 C는 코너가 되고 그렇지 않으면 모서리가 된다. 이 모서리와 코너 판단은 로봇이 주행할 수 있는 영역과 그렇지 못하는 영역 (물체의 내부 또는 방안에서 벽면의 뒤쪽)을 구별할 때 중요하게 작용한다 [17-19].

코너로 판단된 경우 된 Fig. 3-4와 같이 l_1 과 l_2 를 C 점에서 교차하게 연장하여 코너를 재구성 한다. 이때 C점이 l_1 이나 l_2 상에 존재하거나 두 선분의 C에 가까운 쪽 즉, D와 E 사이의 거리가 δ_d 이상이면 코너로 간주하기가 어려우므로 코너 재구성에서 제외시킨다.

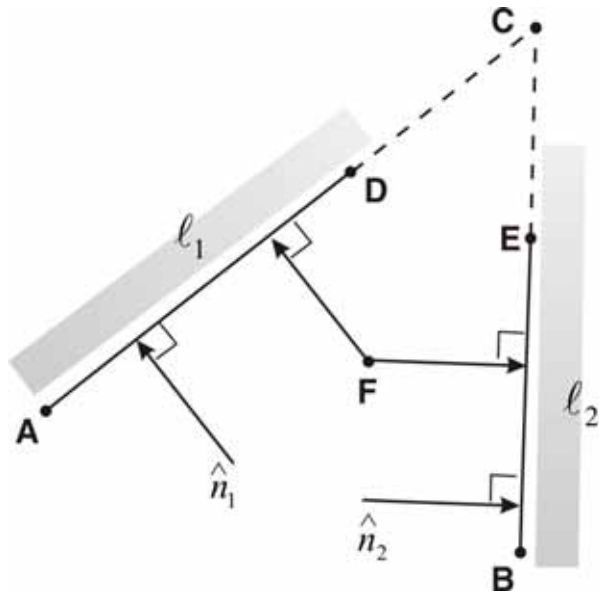


Fig. 3-4 Reconstruction of a corner

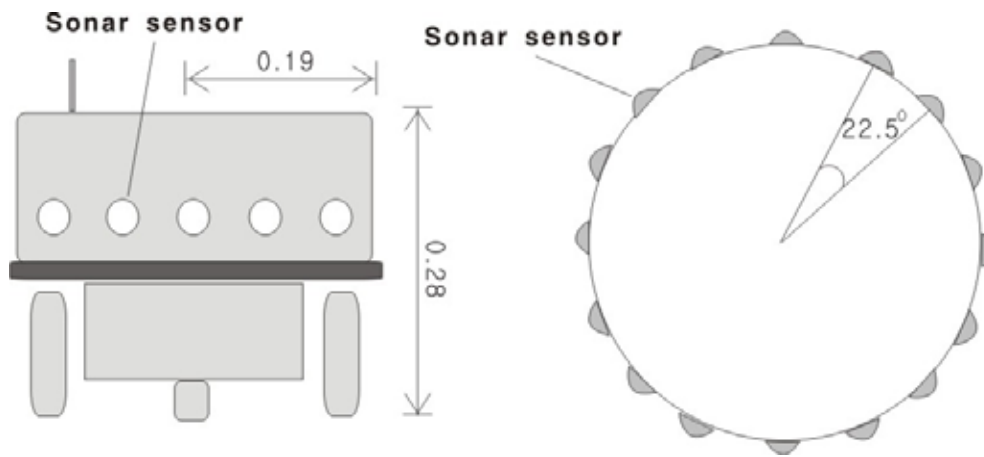
IV. 실험 및 결과

4.1 실험 환경 및 방법

그리드 지도의 방향정보를 이용한 형상지도 작성법의 유용성을 검증하기 위해 실제 로봇을 이용하여 실험을 수행하였다. 실험에 이용된 로봇은 Nomad Scout로봇으로서 Fig. 4-1과 같이 22.5° 간격으로 16개의 Polaroid 초음파센서가 장착되어있고, 음파의 유효 감지각은 22.5°, 감지거리는 0.15m에서 10m 정도이다. 로봇은 각 샘플시간당 16개의 초음파 거리정보와 바퀴에 부착된 엔코더 정보로부터 추측항법(dead reckoning)으로 위치정보를 제공한다. 실험환경은 Fig. 4-2와 같으며 벽, 종이상자, 목재로 외곽을 이루고 있으며, S는 로봇의 출발지점이다.

Fig. 4-3은 전체 알고리즘의 흐름을 나타낸다. 로봇은 각 샘플 당 위치좌표와 16개의 초음파 데이터를 획득하여 국부지도내의 그리드의 방향확률 및 방향정보를 갱신하며 점령 그리드에 대해 클러스터링을 수행한다. 클러스터 결과가 일정 조건을 만족하면 직선성분을 추출하고 그 선분을 기억한다. 국부지도 형성이 끝나면 기억된 직선성분들로부터 선분 통합 및 코너 재구성을 실시하여 전역 형상지도를 완성한다.

로봇이 형성하는 국부지도의 크기는 60×60개의 그리드로 구성되어 있으며 각 그리드의 크기는 0.05×0.05m²이다. 로봇의 이동거리가 2m 이상이며 클러스터가 형성 될 경우 직선추출을 실시하였다.



(a) Configuration of the robot (units : m)



(b) Photograph of the Nomad Scout robot.

Fig. 4-1 Mobile robot

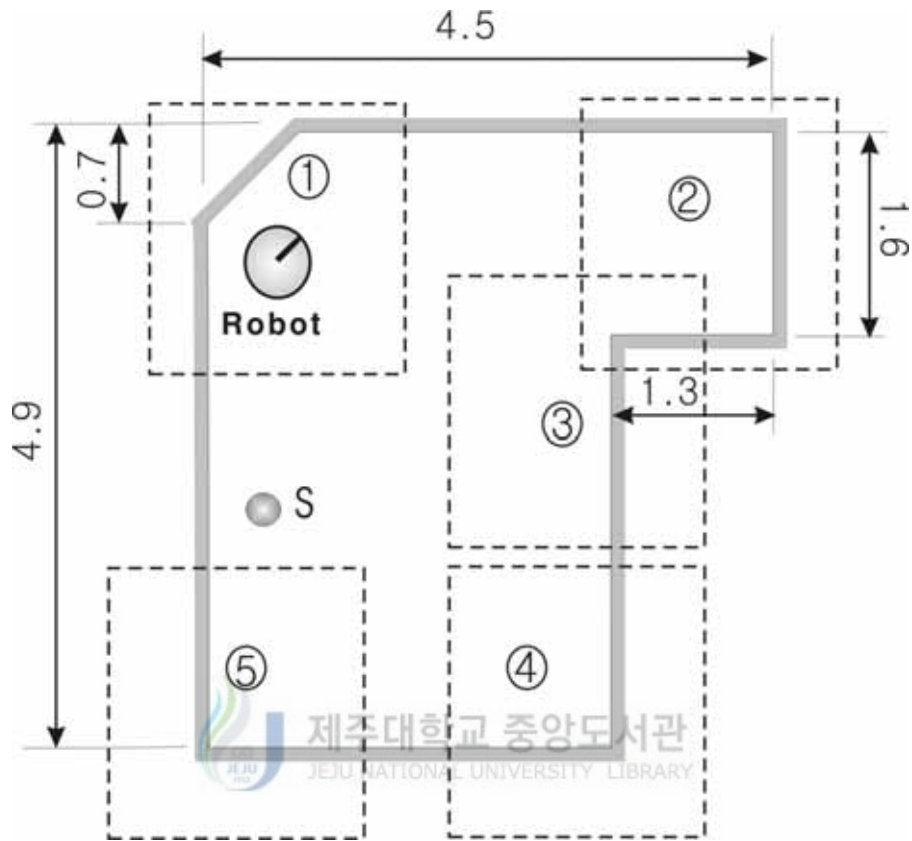


Fig. 4-2 Experimental environments (units : m)

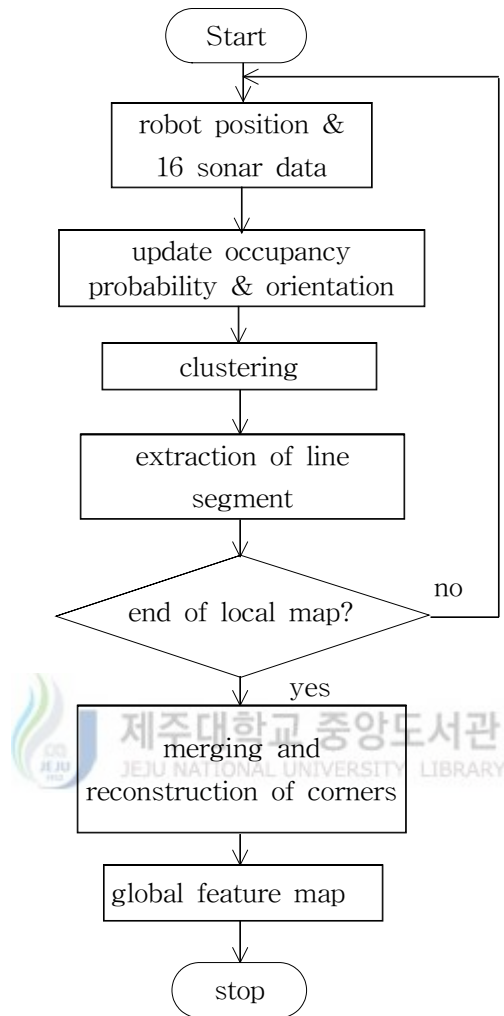


Fig. 4-3 Map building flow chart

로봇의 위치평가는 추측항법 이외에는 수행되지 않았으며 이동 중에 발생하는 위치오차가 그리드지도 형성 시에 그대로 반영되었다. 클러스터 형성을 위한 D_T 및 C_T 는 각각 초음파 센서의 유효 감지각을 고려하여 25° 및 35° 로 하였다. 또한 추출된 직선성분들의 융합에 필요한 파라메타인 δ_w 는 로봇의 위치 및 방향오차를 고려하여 그리드 크기의 3배인 0.15m, δ_θ 는 5° , 그리고 δ_d 는 로봇의 직경과 동일한 0.4m로 설정하였다. 이 파라메타들은 로봇의 위치평가(localization)가 수행 될 경우 위치평가 정밀도에 따라 알맞게 줄일 수 있다.

4.2 실험 결과



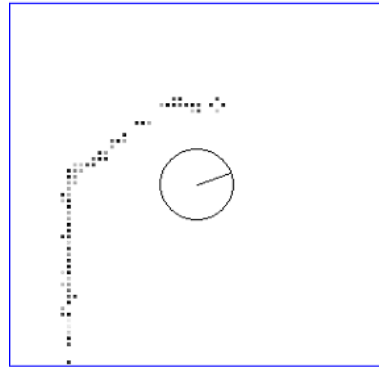
Fig. 4-4는 각 작업환경 내에서 각 모서리 부근에서 선택되어진 국부지도들과 이들 지도내의 각 점령 셀들 중 같은 방향확률 값을 갖는 셀들을 각각의 클러스터로 구분하여 최소자승법에 의한 직선성분을 추출한 결과를 나타낸다. 최소자승법에 의하면 직선의 방정식이 구해지기 때문에 선분의 종점들을 구할 수 없다. 따라서 각 클러스터에 속하는 그리드 중 직선선분 방향으로 최끝단에 해당하는 그리드의 좌표를 각 선분의 종점으로 결정하였다.

Fig. 4-4의 (c)에 나타난 바와 같이 모서리 부분은 감지가 양호하여 두 선분이 서로 교차하여 모서리를 잘 형성하고 있다. 그러나 나머지 경우는 코너가 포함되어 있기 때문에 코너에 두 선분이 교차하고 있지 못하다. 각 국부지도에서 추출된 선분을 이용하여 전체지도를 작성한 결과를 Fig. 4-5에 나타내었다. 그림에서 나타난 바와 같이 동일 직선이 여러 개의 선분으로 분할되어

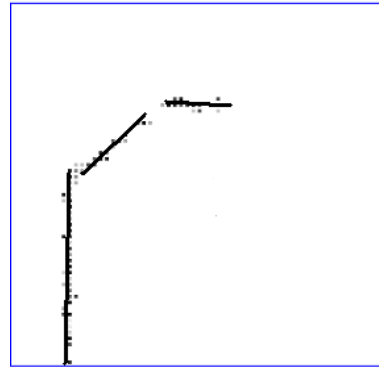
있으며 코너 부분이 나타나 있지 않다.

Fig. 4-6은 Fig. 4-5의 결과에 대해 동일 선분이 여러 개로 평가된 경우는 그 직선성분들을 융합을 하고 코너를 재구성한 결과이다. 재구성된 지도를 살펴보면 전체적인 윤곽이나 직선 선분은 원래의 지도와 일치하지만 각 선분들의 길이나 각도 등은 차이가 나고 있다. 각 직선 성분의 오차를 Table 4-1에 나타내었다. 이것은 현재 이 실험에서는 로봇의 위치보정을 위한 어떠한 방법도 쓰지 않았기 때문에 로봇이 이동함에 따라 위치 및 각도 오차가 발생하여 각 국부지도에서 평가된 직선 선분의 위치 및 각도에 이 오차가 반영되었기 때문이다. 이러한 문제는 로봇의 위치를 추측항법 이외의 위치평가 방법으로 위치 정밀도를 높임으로써 각 직선성분들의 오차를 줄일 수 있다.





local map

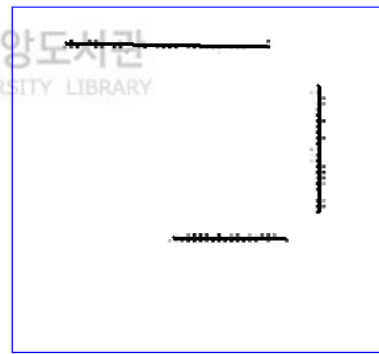


extracted line segment
(number of clusters : 3)

(a) Position 1



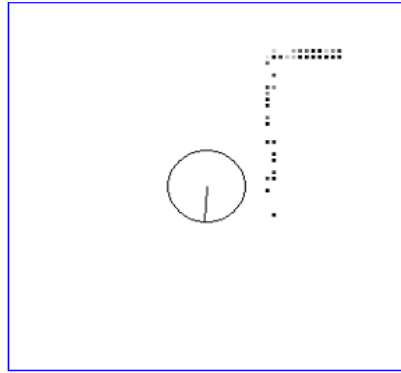
local map



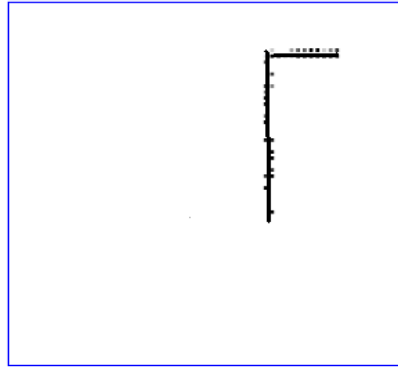
extracted line segment
(number of clusters : 3)

(b) Position 2

Fig. 4-4 Results of line segment extraction

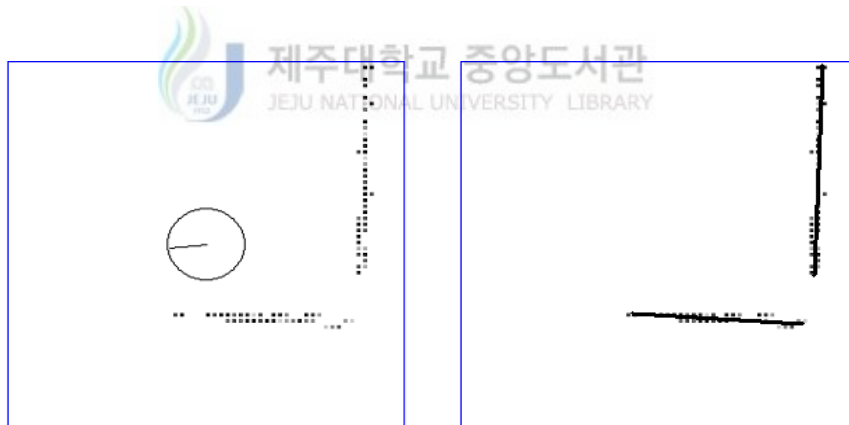


local map



extracted line segment
(number of clusters : 2)

(c) Position 3

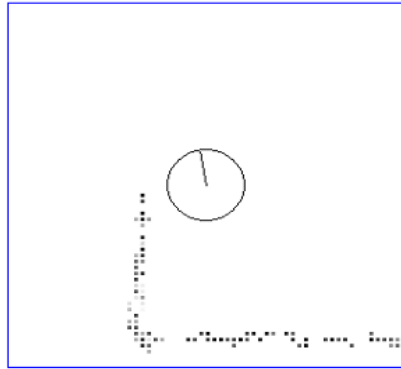


local map

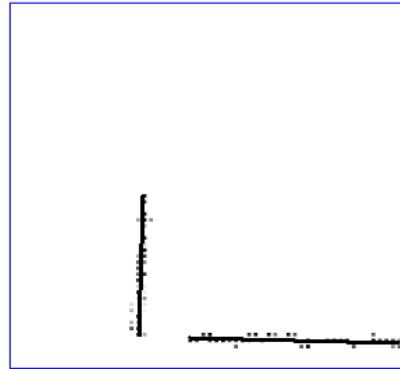
extracted line segment
(number of clusters : 2)

(d) Position 4

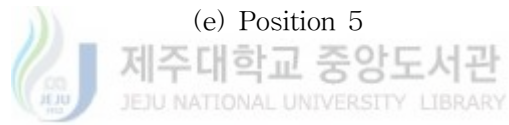
Fig. 4-4 (continued)



local map



extracted line segment
(number of clusters : 2)



(e) Position 5

Fig. 4-4 (continued)

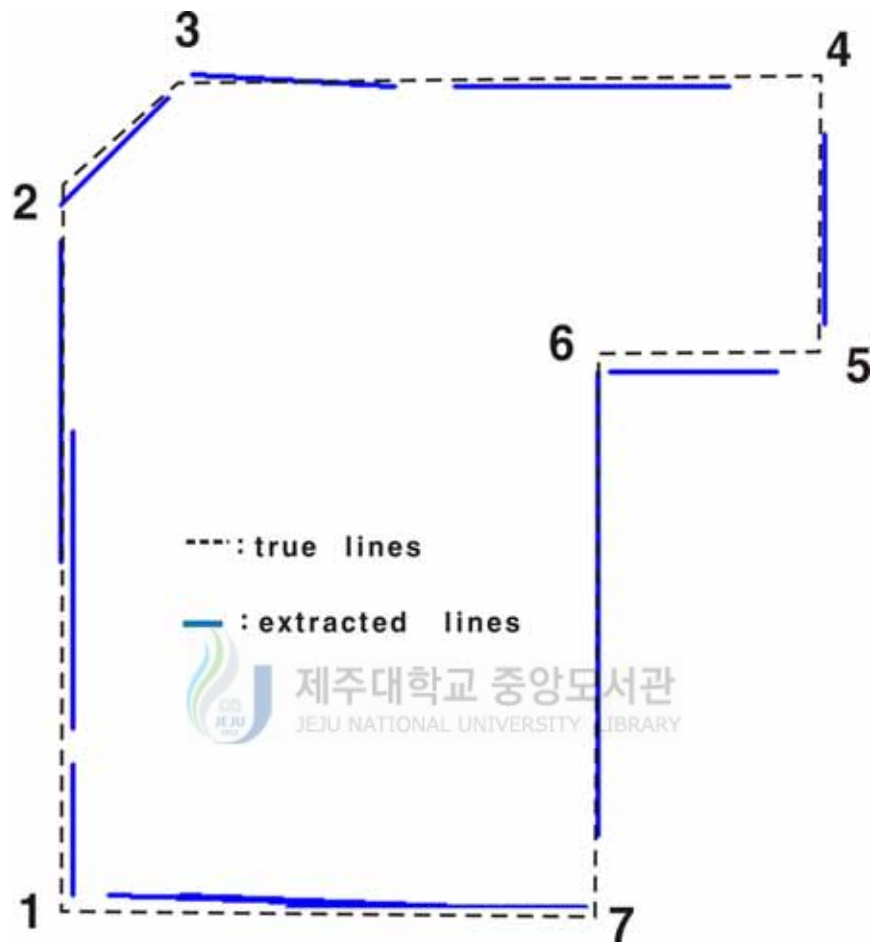


Fig. 4-5 Line segments extracted from all local maps

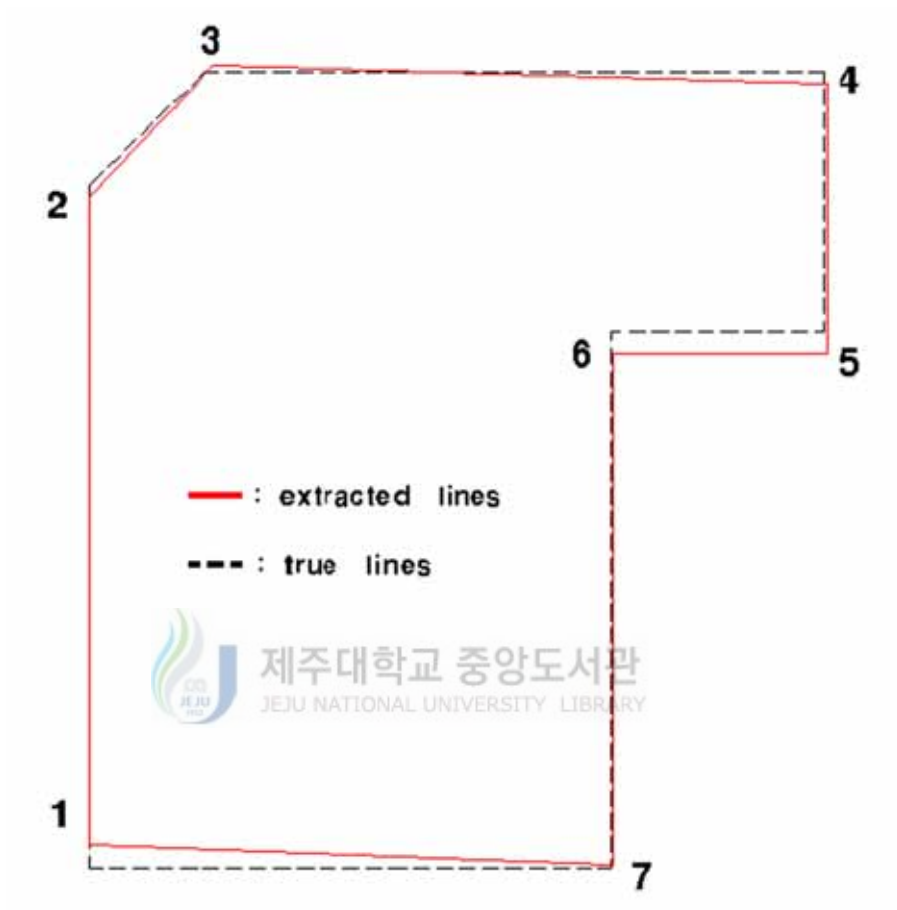


Fig. 4-6 Resulting feature map by merging line segments and reconstruction of corners.

Table 4-1 Position error of each line segment (units : m)

position		True Position	Estimated Position	Error	RMS error
1	X	0.0	0.0	0.0	0.150
	Y	0.0	0.15	0.15	
2	X	0.0	0.0	0.0	0.070
	Y	4.2	4.13	-0.07	
3	X	0.7	0.75	0.05	0.064
	Y	4.9	4.94	0.04	
4	X	4.5	4.52	0.02	0.082
	Y	4.9	4.82	-0.08	
5	X	4.5	4.52	0.02	0.131
	Y	3.3	3.17	-0.13	
6	X	3.2	3.21	0.01	0.130
	Y	3.3	3.17	-0.13	
7	X	3.2	3.21	0.01	0.022
	Y	0.0	0.02	0.02	
Average					0.090
Standard deviation					0.041

V. 결론

본 연구에서는 그리드 형태의 지도에 대해 방향확률을 평가하고 이것으로부터 직선선분을 추출하여 형상 지도를 형성하는 방법을 제시하였다. 그리드 지도는 초음파 정보의 누적이 효과적으로 이루어져 점령영역과 비 점령영역의 구별이 양호한 장점이 있지만 메모리 사용이 지나치게 과중하여 넓은 공간에 적용하기 어렵다. 반면에 형상지도는 위치추적에 유리하며 요구되는 메모리가 최소화 되지만 한 위치에서 360° 전 방향에 대해 조밀한 데이터가 필요하다는 단점이 있다. 본 연구에서 제안한 방법은 이 두 가지 지도의 장점을 결합한 것으로서 조밀하지 않는 데이터만으로도 넓은 공간에 대해 위치추적에 유리한 형상지도 형성이 가능하다.

제안된 방법은 초음파 센서의 거울효과 특성을 이용하여 그리드의 방향정보를 평가하고, 이 방향정보를 이용하여 클러스터를 형성하여 직선 선분을 추출한다. 추출된 직선 선분은 통합과정을 거쳐 최종적으로 전역 형상지도를 형성한다. 개발된 방법을 실험으로 검증한 결과 다수의 선분이 공존하는 환경에서도 각각의 직선선분을 독립적으로 추출이 가능하였으며 추출된 직선선분을 이용한 형상기준 지도 작성의 가능성이 확인되었다. 이상의 연구결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

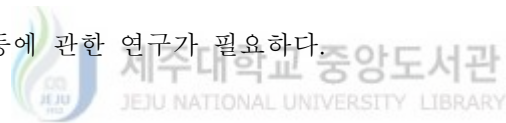
1. 초음파 센서의 거울효과 특성을 이용하여 그리드 지도작성 시에 각 그리드의 방향정보 평가가 가능함이 확인되었다.
2. 다수의 직선선분이 공존하는 환경에서 방향정보를 이용하여 클러스터를 형성함으로써 각 직선에 해당하는 그리드를 따로 분리할 수 있다.

3. 각 클러스터로부터 최소자승법을 이용함으로써 직선성분을 용이하게 추출할 수 있으며 클러스터 내의 각 그리드의 직선에 대한 상대 위치로부터 추출된 선분의 양 끝점을 평가할 수 있다.

4. 동일 직선선분이 다수의 선분으로 분할되는 경우에 로봇의 위치 및 방향 오차를 고려한 적당한 조건을 설정함으로써 하나의 선분으로 융합할 수 있는 가능성이 제시되었다.

5. 재구성된 형상지도의 위치 정확도는 로봇의 위치 및 방향 불확실성에 의존되며 따라서 로봇의 위치 및 방향 불확실성을 줄이는 연구가 필요한 것으로 분석되었다.

6. 직선선분 융합 및 코너 재구성은 설정된 조건 및 형상 추출 시기에 따라 달라질 수 있으므로 형상의 위치 불확실성을 고려한 최적의 조건 설정 및 형상 추출 시기 등에 관한 연구가 필요하다.



VI. 참고문헌

- [1] Moravec, H. 1988, Sensor fusion in certainty grids for mobile robots, AI Magazine, Vol. 9, No. 2, pp.61~74.
- [2] 임종환, 1994, 초음파센서를 이용한 자율이동로봇의 지도형성 탐사 및 경로계획, 박사학위논문, 포항공과대학교.
- [3] Elfes, A. 1987, Sonar-based real-world mapping and navigation, IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol. 3, No. 3, pp.249~265.
- [4] Lim, J. H. and Cho, D. W. 1994, Specular Reflection Probability in Certainty Grid Representation, Trans. of ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Vol. 116, pp.512~520.
- [5] Lim, J. H. and Cho, D. W. May 12-14 1992, Physically Based Sensor Modeling for a Sonar Map in a Specular Environment, IEEE International Conference on Robotics and Automation, Nice, France, pp.1714~1719.
- [6] Lim, J. H. and Leonard, J. J. 2000, Mobile Robot Relocation from Echolocation Constraints, IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 22, No. 9, pp.1035~1041.
- [7] Kang, S. K. and Lim, J. H. 1999, Sonar Based Position Estimation System for an Autonomous Mobile Robot Operating in an Unknown Environment, KSME International Journal, Vol. 13, No. 4, pp.339~349.
- [8] Moravec, H. P. and Elfes, A. 1985, High Resolution Maps from Wide

- Angle Sonar, IEEE International Conference on Robotics and Automation, St. Louis, pp.116~121.
- [9] Borenstein, J. and Koren, Y. 1991, The Vector Field Histogram Fast Obstacle Avoidance for Mobile Robots, IEEE Transaction on Robotics and Automation, Vol. 7, No. 3, pp.278~288.
- [10] Borenstein, J. and Koren, Y. 1991, Histogramic In-Motion Mapping for Mobile Robot Obstacle Avoidance, IEEE Transaction on Robotics and Automation, Vol. 7, No. 4, pp.535~539.
- [11] Leonard, J. J. and Durrant-White, H. F. 1992, Direct Sonar Sensing For Mobile Robot Navigation, Kluwer Academic Publisher.
- [12] 홍현주, 권석근, 노영식, 2001, 초음파센서를 이용한 이동 로봇의 직선선분 지도 작성, 제어자동화시스템공학회지, 제 7권, 제 9호.
- [13] Ballard, D. H. 1982, Computer Vision, Prentice Hall, New Jersey.
- [14] Berger, J. O. 1985, Statistical Decision Theory and Bayesian Analysis, Springer-Verlag, New York.
- [15] Kuc, R. and Viard, V. B. April 1991, A Physical Based Navigation Strategy for Sonar-Guided Vehicles, The International Journal of Robotics Research, Vol. 10, No. 2, pp.75~87.
- [16] Bozma and Kuc, R. December 1991, Building a Sonar Map in a Specular Environment Using a Single Mobile Sensor, IEEE Transaction on PAMI, Vol. 13, No. 12, pp1260~1269.
- [17] Gonzalez, J., Stentz, A., Ollero, A. May 1992, An Iconic Position Estimator for a 2D Laser Range Finder, IEEE International

- Conference on Robotics and Automation, Nice, France, pp.2646~2651.
- [18] Crowley, J. May 1989, World modeling and position estimation for a mobile robot using ultrasonic ranging, IEEE International Conference on Robotics and Automation, Scottsdale, AZ, USA, pp.674~681.
- [19] Crowley, J. March 1986, Navigation for an intelligent mobile robot, IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol.RA-1, No. 1.



감사의 글

항상 초심이란 단어를 머리에 떠 올리며 대학원 생활을 보내려고 했지만 바쁘다는 핑계로 최선을 다하지 못했던 것 같습니다. 지도교수님께 처음에 말씀드렸던 배움에 대한 각오를 끝까지 지키지 못한 게 지금에 와서 죄송스럽기만 합니다. 아무튼 이런 부족한 저에게 많은 지도와 격려를 해 주신 주위 분들에게 감사의 마음을 전하고자 몇 자 적어 봅니다.

논문은 자기가 세상에 내놓는 첫 번째 책이라 하시며 늦은 시간까지 저를 지도해 주신 임종환 교수님께 제일 먼저 감사의 마음을 전하고 싶습니다. 교수님께서 베풀어 주신 가르침 정말 소중하게 간직하며 인생에 좋은 지표로 삼겠습니다. 학부시절부터 항상 주위에서 묵묵히 많은 지도를 해주신 권기린 교수님, 김귀식 교수님, 허종철 교수님, 현명택 교수, 정동원 교수님께 깊은 감사의 말씀을 드리고 싶습니다. 또한 인생의 선배로서, 스승으로서 많은 관심을 보내주신 조경호 교수님, 최경현 교수님, 박윤철 교수님께도 진심으로 감사드립니다. 커피 한 잔 하면서 과선배로서 많은 격려를 해주신 강철웅 교수님, 형님처럼 서글서글하게 반겨주시던 김상재 교수님도 거듭 감사의 마음을 전하고 싶습니다. 항상 자기 일처럼, 논문뿐만 아니라 나의 주변 일까지 관심을 가져준 승균 형, 사랑스런 후배 상철, 민호, 도성, 동훈, 희철 외 실험실 후배들에게도 고마움의 마음을 전합니다. 각자의 전공과 분야에서 서로 다른 논문을 준비하면서도 서로에게 많은 격려와 도움을 보내준 세웅, 경조, 상혁 외 대학원 졸업동기들에게도 졸업을 축하하고 싶습니다. 또한 바쁘지만 많은 도움을 준 사무실 승철, 정호 그리고 가끔씩 격려의 말을 아끼지 않은 명범, 경부, 과 졸업 동기들에게도 더불어 감사드립니다.

늘 부족한 남편이지만 애 키우면서 걱정 많이 해주던 나의 각시, 강정아 그리고 딸 가은에게도 고마움을 전하고 싶습니다. 그리고 어머니, 장모님, 동생 영철, 승철, 그리고 처형 외 가족들에게도 뒤늦게나마 감사의 마음을 전합니다. 도와주신 모든 분들의 마음을 고이고이 간직하면서 더 나은 내일을 위해 작은 첫 출발이라 생각하면서 감사의 글을 마무리 합니다.

2005년 새해를 맞이하며 ... 김 재 철